



Analýza teplot v ozubení pastorku stálého převodu

Disertační práce

Studijní program: P2302 – Stroje a zařízení
Studijní obor: 2302V010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Ing. Martin Mazač**
Školitel: doc.Ing. Miroslav Malý, CSc.





The Final Drive Pinion Gearing Temperature Analysis

Dissertation

Study programme: P2302 – Machines and Equipment
Study branch: 2302V010 – Machines and Equipment Design
Author: **Ing. Martin Mazač**
Supervisor: doc.Ing. Miroslav Malý, CSc.



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Abstrakt

Tato práce se zabývá analýzou teplotní zátěže ozubení pastorku stálého převodu automobilové převodovky. Laboratorní stav pro provoz a zatěžování převodovky, a také zařízení pro měření teplot v zubech pastorku byly navrženy, sestaveny a ověřena jejich funkce při experimentálním výzkumu. Teploty v několika zubech rotujícího pastorku jsou měřeny vloženými termistory, přenos signálu z hřídele je realizován optickou metodou. Byl vytvořen speciální software pro usnadnění ovládání, kalibraci a vyhodnocení dat. Funkce systému byla ověřena na sérii měření provedených při různých zařazených rychlostních stupních, otáčkách a zatíženích (výkonech), výsledky měření jsou v práci shrnuty a popsány.

Abstract

The thesis focuses on the measurement of pinion gear teeth temperature in an automobile gearbox. A test stand for gearbox loading and a gear teeth temperature measurement system were designed, constructed, and used for experimental investigations. The temperature inside multiple teeth of a rotating pinion gear is measured by embedded thermistors, and an optical method is used to transfer the signal from the shaft. Special software was written to facilitate operation, calibration and data processing. The setup was validated on a series of runs spanning different gears, rotating speeds, and power levels, the results of which are described and summarized.

Poděkování

Za velice kvalitní vedení práce a podnětné připomínky, které přispěly ke zvýšení její kvality, bych chtěl poděkovat svému školiteli panu doc. Ing. Miroslavu Malému, CSc.

Dále bych rád poděkoval panu doc. Ing. Miroslavu Svobodovi a Ing. Pavlu Herajnovi za neocenitelnou pomoc při návrhu a výrobě zařízení pro měření teplot.

Za pomoc při výrobě zařízení a týmovou podporu patří dík kolegům Ing. Luboši Dittrichovi a doc. Michalu Vojtíškoví, Ph.D., MSc..

Obsah

Seznam zkratek a symbolů	8
1 Úvod	10
1.1 Téma dizertační práce	11
1.2 Cíle dizertační práce	11
2 Disipace energie v převodovkách	12
2.1 Děje ovlivňující funkci převodovek a disipaci energie	14
2.2 Souhrn současného stavu řešené problematiky	19
2.3 Kinematické, silové a energetické poměry ozubení	20
3 Zkoušení převodovek	21
3.1 Zkušební stavy	21
4 Užitá metoda, experimentální zařízení a měření	23
4.1 Užitá metoda	23
4.2 Návrh stavu	24
4.2.1 Převodovka - měření	25
4.2.2 Pohonná jednotka	26
4.2.3 Energetické poměry	27
4.2.4 Dynamometr	28
4.3 Zkušební stanoviště - stavba	28
4.3.1 Rám a uchycení hlavních částí	29
4.3.2 Části pro zajištění chodu spalovacího motoru	29
4.3.3 Přestavba třecí spojky	32
4.3.4 Propojovací hřídel	34
4.3.5 Blok motoru pro uchycení převodovky	35
4.3.6 Výstupní hřídel	39
4.4 Měření teplot - metody, snímače, kalibrace	39
4.4.1 Snímače	39
4.4.2 Systém pro přenos signálu	41
4.4.3 Zkušební stav pro testování zařízení pro přenos signálu z ro- tující hřídele	44
4.4.4 Kalibrace - získání kalibračních dat	45
4.4.5 Kalibrace - dopočet konstant termistorů	46

4.5	Zástavba zařízení pro měření teplot	50
4.5.1	Umístění snímačů teploty	50
4.5.2	Hloubení otvorů pro termistory	52
4.5.3	Úpravy pro průchod vodičů čidel teploty	55
4.5.4	Další dílčí úpravy provedené na převodovce a bloku motoru pro její uchycení	57
4.5.5	Montáž termistorů a rotujících částí zařízení pro měření teplot	60
4.5.6	Závěrečná montáž zařízení	63
4.6	Měření na zařízení	64
4.6.1	Zátěžné režimy	64
4.6.2	Popis vyhodnocování	65
4.6.3	Popis zařízení - dynamometry	69
4.6.4	Měřené veličiny	69
4.6.5	Podmínky měření	70
4.6.6	Zadání parametrů a mezních hodnot měřeného řetězce	71
4.6.7	Spouštění zařízení	71
4.6.8	Ovládací panel	72
5	Diskuze poznatků a výsledků	76
5.1	Závislost "teplota-čas" pro jednotlivé rychlostní stupně	76
5.2	Závislost "teplota-otáčky-zatížení"	79
5.3	Porovnání teplot při provozu v rozdílných hladinách výkonu	80
5.4	Teplota ve sledovaných místech zubů	85
5.5	Teplota oleje a teplota ozubení	87
6	Závěr	90
	Literatura	92
	Seznam publikací autora souvisejících s řešenou problematikou	95
	Seznam ostatních publikací autora	97
A	Přílohy	100
A.1	Tabulka zkušebních režimů	101
A.2	Základní grafy průběhů teplot	103
A.3	Průměry teplot naměřených v zubech	119
A.4	Diagramy průměrných teplot	125
A.5	Teploty ozubení při konstantním výkonu	131
A.6	Porovnání teplot oleje a teplot ozubení	137
A.7	Diagramy diferencí mezi teplotami ozubení a teplotami oleje	141

Seznam zkratek a symbolů

3D	3-Dimension, trojrozměrné
A[Ω]	termistorová konstanta /materiál, tvar/
A/D	analog / digital
ATC	advanced temperature calibrator
b [mm]	šířka ozubení
B_{max} [K]	maximální dosazovaná hodnota teplotní konstanty
B_{min} [K]	minimální dosazovaná hodnota teplotní konstanty
B_x [K]	teplotní termistorová konstanta /materiál/
CLK	clock
CS	chip select
ČSN	česká technická norma
ČVUT	České vysoké učení technické
DH	double hetero
DIN	data in
DOUT	data out
DSG	direct shift gear
e [-]	základ přirozeného logaritmu
EŠP	evolventní šroubová plocha
FS	fakulta strojní
G_w [-]	přenos energie
HCR	high contact ratio
HTP	high torque performance
hvirt [mm]	pohyb elektrody při hloubení otvorů pro termistory
i [-]	převodový poměr
i_c [-]	celkový převodový poměr
IR	infrared
k [-]	směrnice přímky
k_x	směrnice funkce přímky vzešlé aproximací
KM	koncová matice
KVM	Katedra vozidel a motorů
LED	light-emitting diode
M_k [Nm]	točivý/krouticí moment
Mk_{vst} [Nm]	vstupní točivý moment
Mk_{vst} [Nm]	výstupní točivý moment
n [min⁻¹]	otáčky
n_{vst} [min⁻¹]	vstupní otáčky
n_{vst} [min⁻¹]	výstupní otáčky
NTC	negative temperature coefficient
P [W]	obecný výkon
P_1 [W]	vstupní výkon
P_2 [W]	výstupní výkon
P_{dis} [W]	disipovaný výkon

$P_{vst.}$ [W]	vstupní výkon
$P_{vyst.}$ [W]	výstupní výkon
PC	personal computer
poz.	pozice
PT	platinový teploměr
PTC	positive temperature coefficient
q [-]	úsek vytnutý přímkou /posunutí/
R [Ω]	elektrický odpor
R_{25} [Ω]	odpor termistoru při 25°C
R_i [Ω]	dopočtený elektrický odpor při zvolené teplotě t_i
SMD	surface mount device
SPI	serial peripheral interface
st	stupeň
T[K]	absolutní teplota
t_i [°C]	ideální kalibrační teplota
T_{fin} [°C]	teplota ozubení na konci měřeného intervalu
T_{start} [°C]	teplota ozubení na začátku měřeného intervalu
TU	technická univerzita
TUL	Technická univerzita v Liberci
u_i [-]	hodnota teploty
UART	universal asynchronous receiver and transmitter
USB	universal serial bus
VOCH	vnější otáčková charakteristika
VŠB	Vysoká škola báňská
VW	Volkswagen AG
výst.	výstupní
W_1 [J]	vstupní energie
W_2 [J]	výstupní energie
W_{dis} [J]	disipovaná energie
W_x [J]	obecná energie
x [-]	obecná proměnná
β [°]	úhel sklonu boční křivky zubu
Δ [°C]	rozdíl teploty ozubení a oleje
η_c [-]	celková účinnost
ϑ [°]	teplota

1 Úvod

V rozličných odvětvích průmyslu je stále zapotřebí transformace mechanické energie. K tomuto účelu jsou hojně využívány převody ozubenými koly. Od pouhého zaručení spolehlivé funkčnosti, jež je nutnou podmínkou, se výzkum zaměřil také na kvalitu přenosu a eliminaci nežádoucích jevů, mezi něž patří disipace energie. Velká část disipované energie se mění na teplo, které ovlivňuje fyzikální vlastnosti a chování mnoha součástí převodovky.

Převodovky automobilů jsou v posledních letech, vzhledem k masovosti jejich výroby a uplatnění v provozu, předmětem četných inovací. Jsou na ně kladeny vysoké nároky jak ve smyslu konstrukčních parametrů (pevnostní a kinematická kritéria), tak z pohledu následných provozních vlastností (životnost, účinnost, hlučnost).

V evropských zemích je doposud velice rozšířeno používání klasické mechanické převodovky, u níž je transformace energie realizována převody ozubenými koly. V těchto typech převodovek je často využíváno čelních ozubených soukolí se šikmými zuby, a tudíž je tomuto typu převodů věnováno velké množství odborné literatury (např. [21], [20]) a je důsledně dbáno na jeho další rozvoj a zlepšování užitečných parametrů.

U čelních soukolí převodovek automobilky dbají především na jejich nízkou hlučnost, avšak stále nepřestávají být aktuální otázky únosnosti a dimenzování zubů. Provozním parametrem převodovky je také její účinnost. Účinnost převodovky ovlivňuje produkci emisí spalovacího motoru, což je velmi diskutované téma. Právě energie, která je disipována v převodovce a na výstupu ji již není možné použít k účinnému pohonu vozidla, se téměř všechna přeměňuje na teplo. Parametr hlučnost a účinnost převodovky jsou vzájemně závislé a je nutné hledat jejich nejlepší poměr.

Část mechanické energie je disipována [32], z toho majoritní je přeměna na teplo. Za kritická místa převodovky vzhledem k vývinu tepla můžeme považovat ložiska (třecí i valivá), ucpávky, ale především místa kudy je přenášen výkon, tedy boky zubů ozubených kol, které jsou v přímém kontaktu, s relativním pohybem za působení značných normálních sil. Tento děj probíhá pouze v době trvání záběru zubů.

Po záběru dvojice (či více dvojic) je teplo odváděno tělesem kola dále, avšak značný podíl na odvodu tepla má olej, který plní funkci maziva, ale i chladiwa. Teplo je příčinou mnoha dějů, které mají za následek ovlivnění provozu převodovky. Nejvíce tepla vzniká zřejmě při záběru boků zubů kol a proto je vhodné děje zde probíhající stále zkoumat.

Experimenty s měřením teplot v blízkosti boků zubů a tělesech kol během provozu soukolí již probíhaly [28] [8], avšak v těchto pracích se jednalo pouze o pokusná soukolí nezastavěná ve skutečné převodovce.

Po konzultacích s odborníky a prostudování dostupné literatury, byl výzkum vývinu tepla a teplot zaměřen na jedno z kritických míst převodovky, a to na ozubení soukolí stálého převodu. Měření probíhala na reálné převodovce, jako experimentální byla zvolena převodovka Škoda Auto a.s. řady MQ100.

1.1 Téma dizertační práce

Výzkum disipativních dějů a analýza teplot na soukolí stálého převodu automobilové převodovky MQ100 za různých provozních režimů, sledování teploty jako provozního parametru převodu, možný vliv teplot na okolí jejich vzniku. Vzhledem ke komplexnosti problému, byla pozornost soustředěna zejména na experimentální část výzkumu. Pro měření bylo nutné navrhnout a postavit zařízení, které by umožnilo realizovat výzkum. Toto zařízení a metodika měření je tématem této práce.

1.2 Cíle dizertační práce

Po seznámení se s dostupnou literaturou, byly realizovány kroky, které měly napomoci objasnění tématu. Pozornost byla zaměřena na zkoumání dějů za provozu, proto dílčí cíle obsahují zejména:

- návrh a sestavení zkušebního stavu pro zatěžování převodovky v laboratorních podmínkách a měření provozních veličin
- návrh zařízení a sestavení metodiky pro měření teplot v zubu soukolí (pastorek stálého převodu) v reálné automobilové převodovce (MQ 100 - viz dále),
- měření teplot a sledování teplotních trendů v ozubení pastorku stálého převodu za různých provozních režimů převodovky,
- vyhodnocení naměřených dat.

2 Disipace energie v převodovkách

Převod ozubenými koly je používán jak v mnoha průmyslových aplikacích, tak i v dopravě při transformaci výkonu v hnacím ústrojí, jehož součástí jsou spalovací motory. Spalovací motory jsou celosvětově velkým producentem škodlivých emisí, proto je cílem konstruktérů dosáhnout co nejvyšší účinnosti při přenosu výkonu a tím přispět k jejich snížení.

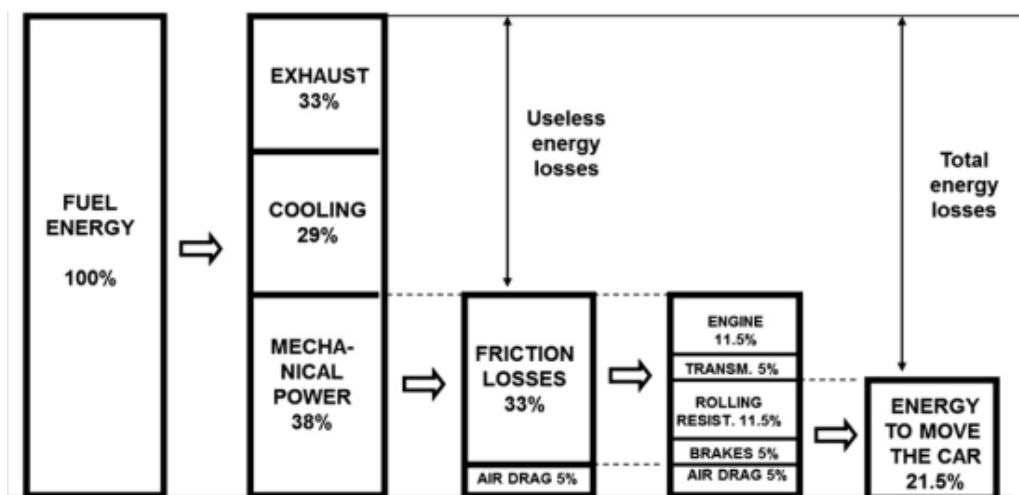
Z dostupných zdrojů je patrné, že výzkumu čelních ozubených soukolí je věnována značná pozornost a kladen důraz na jejich další vývoj. Zvláštní požadavky jsou na snížení hlučnosti a zvýšení únosnosti ozubení. Problematika přenosu energie v hnacích ústrojích (a převodů vůbec) je multidisciplinární a zahrnuje několik technických oblastí.

Pro názornost uvedme, že celková hrubá spotřeba ropy byla v roce 2009 3882 milionů tun ropného ekvivalentu, z tohoto množství bylo 62% použito v dopravě [13]. Z tohoto množství připadlo:

- 72% na pozemní dopravu
 - 45% osobní automobily
 - 20% nákladní automobily
 - 7% autobusy a lehká vozidla
- 13% lodní doprava
- 11% letectví
- 4% železniční dopravu.

Jak je z těchto dat patrné, vozidla pro pozemní dopravu tvoří nezanedbatelnou část spektra používaných dopravních prostředků a právě u nich je nutné transformovat výkon spalovacího motoru pomocí převodovek.

Z výše uvedených údajů je patrné, že nejpočetnější zastoupení mají z pozemních dopravních prostředků osobní automobily. Schéma využívání dodávané energie paliva v osobním automobilu je na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Využití energie paliva v osobním automobilu [13]

Je patrné, že jen zlomek celkové dodávané energie je využívána skutečně k pohybu vozu. Velká část energie je disipována již v motoru a následně v převodovém ústrojí.

U motorových vozidel se pro transformaci výkonu v hnacím ústrojí využívá několik systémů převodovek. Vzhledem k použitému systému transformace může být i odlišná volba převodu. V evropských zemích je převážně využívána varianta převodovky s několika ozubenými převody a pevně definovaným převodovým číslem, kdy volba a řazení převodu (rychlostního stupně) probíhá zpravidla manuálně. Převodovky tohoto druhu jsou relativně levné pro výrobu a přitom spolehlivé, avšak některými uživateli může být hodnoceno ovládání vozidla jako méně komfortní oproti jiným.

Další systémy převodovek (odlišují se i systémem volby rychlostního stupně), jako jsou např. převodovky automatické s hydrodynamickým měničem, nebo převodovky dvojspojkové (DSG), také využívají ozubených převodů, avšak ty ponecháváme stranou.

Základem tzv. „ztrát“ je disipace energie, což je její nevratná změna na jinou.

Na jednoduchém schématu v obrázku 2.2 je zachycen tok energie (W) a výkonu (P) převodovkou, kdy se v převodovce při transformaci část energie disipuje, což se projevuje jednak tím, že výkon výstupní je menší než příkon, ale také značnou část disipované energie představuje teplo.



Obrázek 2.2: Tok energie a výkonu převodovko

Ke schématu 2.2 uvedme jen dvě jednoduché obecné rovnice kde vztah 2.1 znázorňuje přenos energie G_w . Vztah 2.2 vystihuje ustálený stav a to celkovou účinnost η_c vyjádřenou poměrem výstupního a vstupního výkonu.

$$G_w = \frac{W_2}{W_1} = \frac{W_1 - \sum W_{dis}}{W_1} = 1 - \frac{\sum W_{dis}}{W_1} \quad (2.1)$$

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P_{dis}}{P_1} = 1 - \frac{\sum P_{dis}}{P_1} = \prod_{i=1}^n \eta_i \quad (2.2)$$

Disipaci energie v převodovce popisuje už [16] kde je posuzováno procentuálně vyjádřené rozložení disipované energie připadající na jednotlivé procesy probíhající v převodovce. Procentuální vyjádření jednotlivých tzv. "ztrát" je zapsáno pouze jako přibližné intervaly předpokládaných hodnot.

Za předpokladu, že většina disipované energie se přemění na teplo, dostáváme, i přes relativně vysokou účinnost mechanických převodovek, poměrně značný tepelný zdroj.

Experimentálním výzkumem účinnosti ozubeného soukolí se zabývají autoři například [26].

2.1 Děje ovlivňující funkci převodovek a disipaci energie

Jedním z procesů, ke kterým v převodovkách dochází, je pružná deformace skříně a dalších částí. Touto problematikou se zabývá například práce [9]. Deformace nastávají vlivem mechanického namáhání, ale také jako důsledek změn teploty. Deformace (změna geometrie) vedou ke vzniku napjatosti, nevhodnému zatížení ložisek a také k nesprávným záběrovým poměrům na ozubených kolech. Uvedené děje mají za následek změny oproti původně navrženým rozměrům a mohou vést k nežádoucím projevům, mezi něž patří zvýšení vibrací a hluku nebo tření v ložiskách, a následné zrychlené degradaci, či dokonce k havárii převodovky.

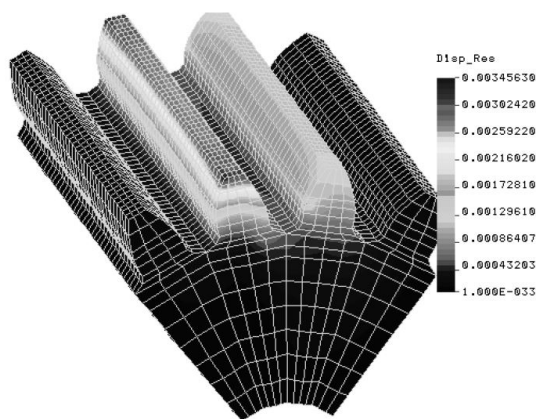
Příklad měření deformací je na obrázku 2.3 [9] - stav pro měření průhybů hřídelů převodovky MQ200 (Škoda Auto a.s.) při zatížení statickým momentem.



Obrázek 2.3: Stav pro měření průhybů hřídelů převodovky [9]

Deformace by bylo možné zaznamenat také přímo na spoluzabírajících zubech kol následkem jejich zatížení. V automobilových převodovkách jsou často používána kola s modifikovaným ozubením, jež má snížit především hlučnost převodovky. Používají se zejména ozubení HCR (high contact ratio) s výškovou a podélnou modifikací tvaru zubu. Modifikace přispívají ke zlepšení záběrových parametrů. Úpravami převodovky pro zlepšení hlučnosti se hlouběji zabývá např. [7]. Hluk a vibrace vznikají jak u kol v záběru, tak i u soukolí, která nejsou zařazena a volně se protáčejí.

S cílem predikovat chování zubů během záběru, lze jejich zatížení simulovat; o výsledcích a možnostech simulace pojednává např. [24]. Na obrázku 2.4[24] je pro názornost zachycen příklad výsledku simulace deformace zatěžovaných zubů.

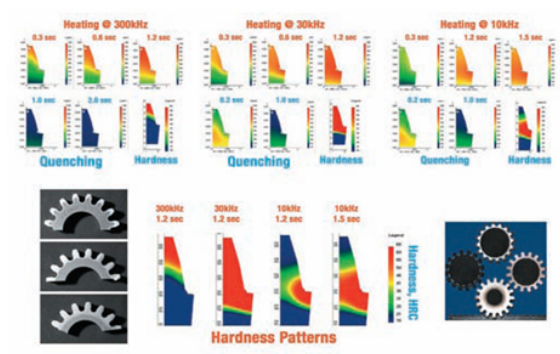


Obrázek 2.4: Deformace zubů - simulace (deformace - posunutí v mm) [24]

Záběr boků zubů je významným místem disipace mechanické energie. Při záběru boků zubů dochází ke skluzům, tření zde přispívá k vývinu tepla a dále dochází k jeho sdílení do okolí.

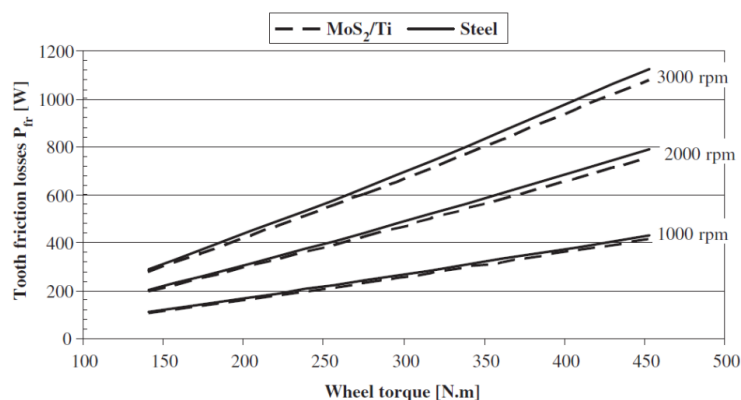
Při nevhodných provozních podmínkách, nebo špatně zvolených parametrech provozu může docházet ke zvýšenému vývinu tepla, přehřívání a degradaci součástí.

V rámci snahy o zlepšení parametrů ozubení (hlučnost, únosnost, účinnost) je kladen důraz na kvalitu zpracování ozubení, a to jak na výrobní geometrickou přesnost, drsnost boků zubů, tak i chemicko-tepelné zpracování. Jako příklad tepelného zpracování lze uvést technologii indukčního ohřevu a následného kalení ozubení viz obrázek 2.5 [29].



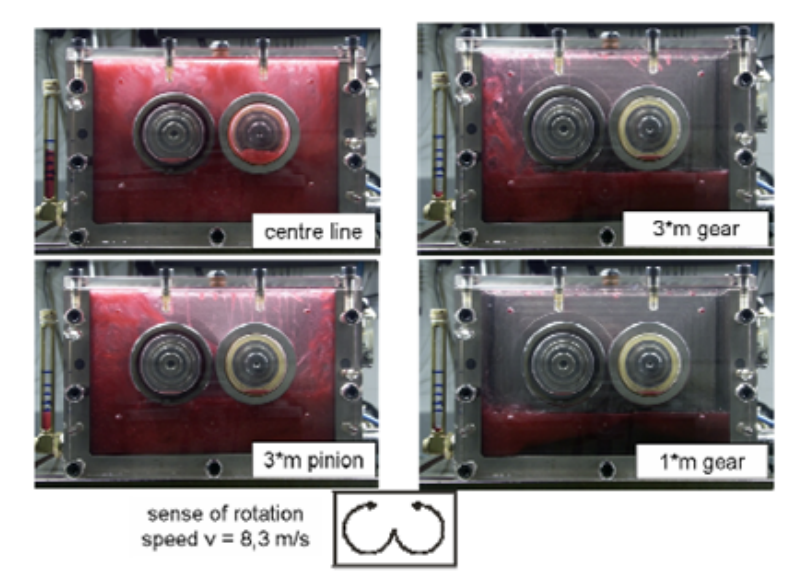
Obrázek 2.5: Indukční kalení ozubených kol [29]

Dalším příkladem zlepšení třecích vlastností boků zubů ozubených kol je povlakování např. MoS_2/Ti . Na obrázku 2.6[19] je zachyceno snížení disipovaného výkonu vlivem povlaku. Dále dochází ke zlepšení odolnost proti opotřebení a vyšší odolnosti proti zadíráání.



Obrázek 2.6: Disipovaný výkon- povlakovaná kola MoS_2/Ti [19]

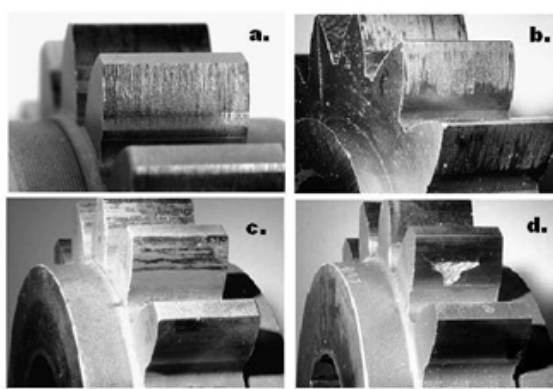
Tření mezi boky zubů je možné částečně eliminovat správným mazáním soukolí, avšak i zde jsou jisté překážky. Jednou z nich je vliv ponoření kola a jeho obvodová rychlost. Na obrázku 2.7 je pro ilustraci zobrazen rozstřík oleje při mazání soukolí. Ponořením soukolí do oleje se hlouběji zabývají práce [17], [11] a [10]. Ponoření má vliv na velikost odporů.



Obrázek 2.7: Rozstřík oleje rotujícím soukolím [12]

Významným faktorem ovlivňujícím mazání je viskozita oleje, ale jak již bylo zmíněno, během funkce převodovky dochází k vývinu tepla a změnám teploty, tato změna je příčinou změn viskozity oleje. Viskozita oleje klesá společně s rostoucí teplotou. Ve skutečném kontaktu boků zubů kol při vysokých teplotách je tloušťka olejového filmu tenká a srovnatelná s nerovnostmi povrchu [14]. Neopomenutelnou funkcí oleje je právě odvod tepla, viz [3].

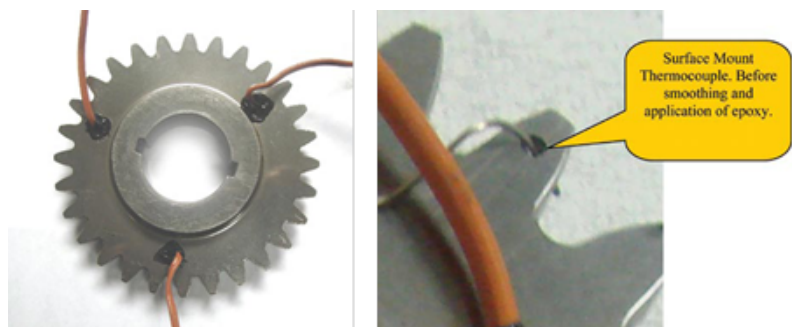
Při nesprávném konstrukčním provedení a provozních parametrech může dojít ke zvýšení teploty. V kombinaci s působením místních tlaků, může docházet ke kontaktnímu porušování povrchu boků zubů. Právě zvýšená teplota a tlak mohou mít za následek degradaci oleje. Pro názornost jsou na obrázku 2.8 zachycena poškození boku zubů, ke kterým může docházet.



Obrázek 2.8: Poškození kol - a. opotřebení, b. zadírání, c. mikropitting d. pitting [12]

Právě sledování teplot by mohlo podat zajímavou informaci o tom, jak bude snášet zařízení svůj běžný provoz. Teplotu lze měřit např. termočlánky umístěnými

přímo pod povrchem zubu. Na 2.9 je zachyceno umístění termočlánků na ozubeném kole.



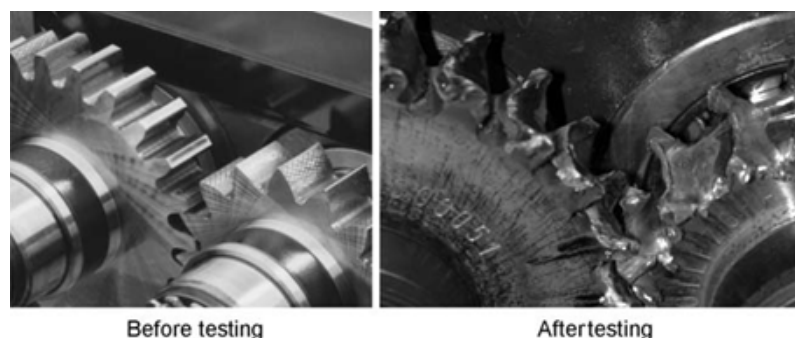
Obrázek 2.9: Ozubená kola a umístění termočlánků [28]

Měřením teplot na ozubeném soukolí se zabývá i článek [8]. Tento článek věnuje pozornost systému mazání soukolí a jeho vlivu na vývin tepla. Jsou měřeny teploty v několika místech zubů a teploty okolního oleje, vzniklé teplo je zaznamenáno při několika režimech provozu soukolí. Teplota je měřena kontaktními i bezkontaktními metodami. Práce se omezuje pouze na měření na experimentálním soukolí s přímými zuby a roztečným průměrem kol 124 mm. Na obrázku 2.10 je zachyceno jedno kolo experimentálního soukolí se zabudovanými teplotními snímači a celá sestava zařízení pro měření.



Obrázek 2.10: Umístění termočlánků v ozubených kolech [8]

Z místa vývinu se teplo dále sdílí do okolí. Při nedostatečném odvodu tepla hrozí přehřátí a možná degradace či havárie soukolí. Při nedostatečném mazání se zvýší součinitel tření, spolu s ním i vyvíjené teplo a dojde ke zvýšení teploty. V důsledku nedostatečného odvodu tepla a zadírávání může dojít k situaci podobné té, zachycené na obrázku 2.11 - ke zničení soukolí.



Obrázek 2.11: Zničené experimentální soukolí [10]

Teplo produkované převodovkou poskytuje náhled na kvalitu přenosu výkonu a potažmo i její účinnost a ta je jedním z parametrů, které nelze při konstrukci opomíjet. Teplota je parametrem, který má souvislost s procesy spojenými s chodem zařízení.

Abychom si utvořili představu o provozních teplotách převodovky, lze přibližná teplotní pole některých částí (skříně) získat také simulací. Výsledky je možné následně ověřit měřením například pomocí termokamer, jak popisuje [27].

2.2 Souhrn současného stavu řešené problematiky

Konstrukce čelních soukolí doznala za posledních 25 let značné změny, zejména v geometrii. Pokrok nastal i v oblasti materiálového inženýrství a aplikaci nových materiálů. Došlo k posunu v užívání olejů a současnému rozvoji tribodiagnostiky. Významným nástrojem pro diagnostiku poruch a chování převodů se stala vibrodiagnostika, která analyzuje negativně působící jevy - vibrace a hluk.

Z dostupné literatury vyplývá, že je ve výzkumu kladen důraz nejen na zvyšování účinnosti [26], ale i na již zmiňovanou hlučnost převodovky [7], [15], [34].

K omezení disipativních dějů v převodovkách přispívá vývoj v oblasti materiálů a povrchového zpracování [19] a je využíváno úprav povrchu ozubení. Disipativní děje jsou zdrojem tepla a příčinou oteplování ozubených převodů, je nutné se s jejich následky vyrovnat i případným využití externího chlazení.

Hlavním místem vývinu tepla jsou boky spoluzabírajících zubů, kde mezi nimi dochází ke tření a je disipována energie. Tento děj je podmíněn především nenulovou skluzovou rychlostí a ta není po celé délce boku zubu stejná.

Měřením teploty na ozubení se zabývají odborné práce jako například [28], [8], dílčí měření je většinou prováděno na experimentálních soukolích. Měření teplot přímo v provozu je méně obvyklé, jako příklad uveďme měření na převodovkách pro větrné elektrárny firmy Wikov. K tomuto měření byly použity termistory a záznam hodnot byl realizován jednotkou otáčející se společně s kolem (realizovatelné vzhledem k velikosti převodovky). Na realizaci měření se podílel Ústav konstruování a částí strojů ČVUT Praha.

2.3 Kinematické, silové a energetické poměry ozubení

Vzhledem k principu ozubených převodů, kdy je zachována kinematická mechanická vazba vstupního a výstupního kola, lze posuzovat vzájemné působení spolupuzabírajících zubů podle dvou hlavních parametrů, a to v závislosti na velikosti působících sil a průběhu skluzových rychlostí.

Kinematické a silové poměry klasických čelních kol se šikmým ozubením byly popsány v širokém spektru publikací, například [20], a proto bych na tyto publikace pouze odkázel.

Během otáčení soukolí může docházet k nepřesnostem vlivem jeho skutečné geometrie. Tento parametr lze vyhodnocovat jako tzv. chybu převodu. Teorie chyby převodu (Transmission error) byla podle zmínky v [7] publikována v padesátých letech dvacátého století (Gregory-Harris-Munro). Metodika posouzení kvality převodu byla také popsána v [22]. Tato metoda posuzuje hlavně provozní jevy, jakými jsou vibrace a hlučnost.

Vzhledem k využití mechanické vazby mezi koly, je chyba převodu stále jen taková, že se odchylky během funkce soukolí nemohou sčítat, tedy po jedné otáčce se vždy kola vrací do zhruba stejné vzájemné počáteční polohy. Tento děj neplatí například pro řemenové převody s třecí vazbou mezi řemenem a řemenicí, na těchto převodech dochází ke skluzu a chyba z jednotlivých otáček se přičítá (kumuluje).

Hodnotit soukolí z pohledu chyby převodu, potažmo jeho vibrací a hluku, je obvyklé, avšak zůstává otázkou jak hodnotit kvalitu přenosu energie.

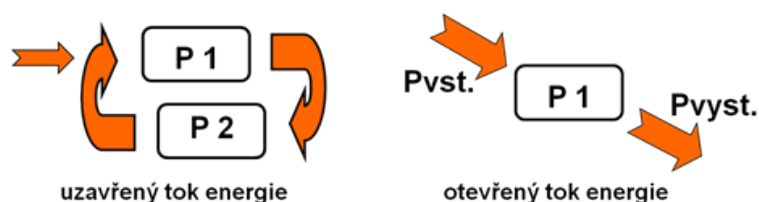
Účinnost převodu je definována v ustáleném stavu jako poměr výkonu na výstupu a příkonu na vstupu. Účinnost není konstantní pro různé provozní stavy, ale závisí na parametrech, mezi ty podstatné patří zatížení a rychlost. Účinnost je ovlivněna i provozními podmínkami, mezi něž patří i teplota, která ovlivňuje uvnitř probíhající děje (tření v kapalinách - mazivech - závislost viskozity na teplotě).

3 Zkoušení převodovek

Hlavním cílem této práce je měření veličin během provozu automobilové převodovky a následující rozbor získaných výsledků. Pro tuto část práce bylo nutné sestavit zkušební stav umožňující provoz převodovky v požadovaných režimech zatížení i následné měření zvolených veličin. Jako hlavní sledovaná veličina byla zvolena teplota v blízkosti boku zubu pastorku stálého převodu. Bylo tedy nutné vytvořit metodiku pro provedení těchto měření a zároveň však vybavit stav měřicí aparaturou, aby umožňoval provedení zkoušek. Součástí práce je návrh stavu a metodika měření.

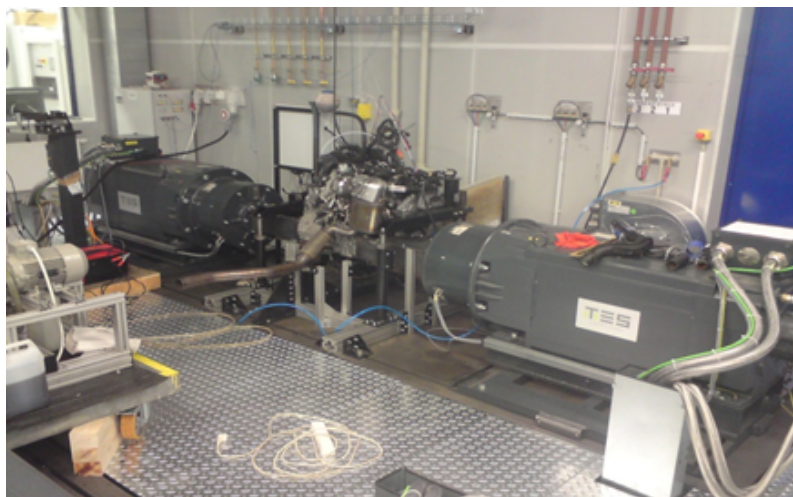
3.1 Zkušební stavy

Pro zkoušení převodovek se uplatňuje několik druhů zkušebních stavů; volba druhu stavu závisí na požadavcích měření. Stavy s uzavřeným a otevřeným tokem energie ukazuje schéma na obrázku 3.1. Stavy s uzavřeným tokem výkonu jsou energeticky méně náročné, neboť se do uzavřeného okruhu přivádí pouze výkon nutný k překonání odporů.



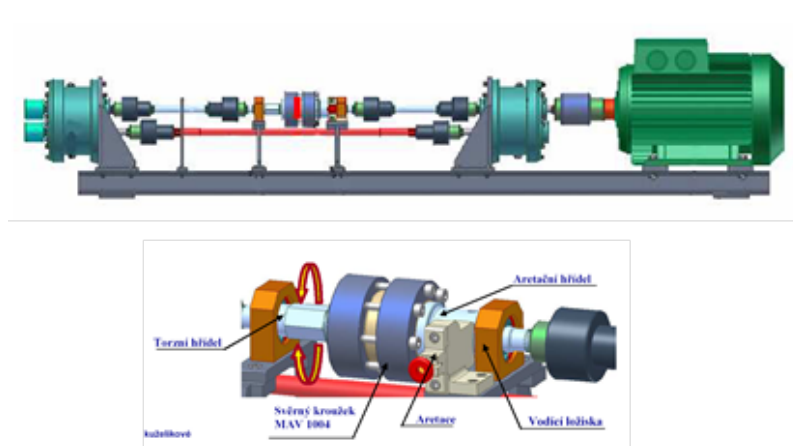
Obrázek 3.1: Tok energie - stavy pro zkoušení převodovek

Za příklad stavu s otevřeným tokem energie můžeme považovat zařízení na obrázku 3.2 umístěné v Laboratoři pohonných jednotek Technické univerzity v Liberci. Na tento stav je možné usadit a testovat celé hnací ústrojí osobního automobilu, je možné zatěžovat každý výstup ("kolo") samostatně. Zařízení lze využít i pro hnací ústrojí 4x4. Stav zahrnuje čtyři dynamometry, které lze provozovat jak v motorickém, tak generátorickém režimu. Dva z celkem čtyř dynamometrů tohoto zařízení jsou zachyceny na 3.2.



Obrázek 3.2: Část stavu s otevřeným tokem energie

Stavy s uzavřeným tokem energie jsou co do energetické náročnosti výhodnější. Do uzavřeného okruhu dodáváme pouze výkon potřebný k překonání odporů. Příklad takového stavu představuje zařízení pro zkoušky životnosti ozubených soukolí s malými moduly na obrázku 3.3, zařízení vzniklo na VŠB - TU Ostrava. Detail zařízení pro vnesení statického krouticího momentu do řetězce je zachycen na výřezu obrázku 3.3. Uvedený příklad stavu je principiálně podobný zařízení užívanému v laboratoři ČVUT v Praze.



Obrázek 3.3: Stav s uzavřeným tokem energie [6]

Pro realizaci měření jsem zvolil stav s otevřeným tokem výkonu. Konstrukce stavu a jeho hlavní části budou popsány v následujících kapitolách.

4 Užitá metoda, experimentální zařízení a měření

Následující podkapitoly popisují konstrukční řešení, výrobu a montáž částí experimentálního zařízení, které je původním návrhem disertanta. Návrh částí byl podmíněn několika faktory navzájem spolu souvisejícími.

4.1 Užitá metoda

Před začátkem konstrukčních a výrobních prací bylo nutné zvolit metody jakými bude zadaná problematika řešena.

Vzhledem k množství faktorů ovlivňujících přenos a disipaci energie v převodovce, potažmo změny teplot, jsem se rozhodl pro experimentálním přístup k řešení problematiky. Matematický popis zkoumaného procesu je možný pouze ve zjednodušené formě, a to za předpokladu známých hodnot parametrů. Experimentální přístup je náročnější na konstrukci a výrobu zkušebního zařízení, avšak při měření podává téměř okamžitě relativně spolehlivý přehled o měřených veličinách. Měřené hodnoty sledovaných veličin jsou určovány s přesností vyhovující pro technickou praxi.

Předpokladem pro úspěšnou realizaci měření je schopnost provozu převodovky při různých zatěžovacích režimech tak, aby byla umožněna zástavba měřicích zařízení a zároveň aby se podmínky jejího provozu co nejvěrněji podobaly podmínkám při běžné zástavbě ve vozidle. Významným předpokladem je zamezení tepelného ovlivnění převodovky od spalovacího motoru. Proto bylo přistoupeno k návrhu a výrobě speciálního stavu pro zkušební provoz převodovky, který tyto požadavky splňuje.

Mezi hlavní sledované veličiny patří teplota ozubení pastorku stálého převodu, proto bylo nutné navrhnout odpovídající systém pro měření teplot v několika místech. Hřídel s ozubeným pastorkem je rotační součást, je však nutné přenášet data o teplotách on-line na statické části zařízení. Pro přenos dat byla zvolena optická metoda využívající infračerveného záření. Umístění diody vysílající záření bylo zvoleno v ose rotace hřídele, snímač záření byl umístěn proti diodě. Tímto uspořádáním byla zaručena stálá dráha záření bez překážek a změn polohy.

Pro měření teplot byly zvoleny polovodičové negastory. Termistory se vyznačují malými rozměry a nízkou tepelnou konstantou, což vyhovuje této aplikaci. Nelinearity snímačů lze kompenzovat softwarově.

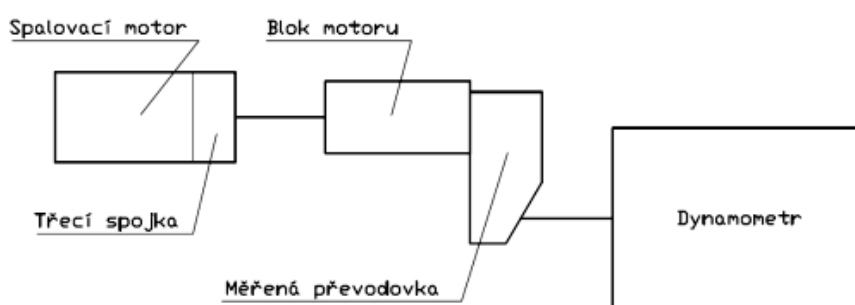
4.2 Návrh stavu

Mezi hlavními faktory, ke kterým jsem při návrhu přihlížel, byly podmínky provozu obdobné jako ve vozidle. Při návrhu jsem vycházel z dostupného vybavení laboratoří katedry.

Byl zvolen systém s otevřeným tokem energie, neboť laboratoř je vybavena vhodným elektrickým dynamometrem, který je schopen programově zatěžovat výstup převodovky podobně jako tomu je při provozu vozidla.

Pro pohon ústrojí byl zvolen spalovací motor, tedy jako ve vozidle. Stanoviště v laboratoři je vybavené prostředky, které umožňují ovládat spalovací motor a dynamometr.

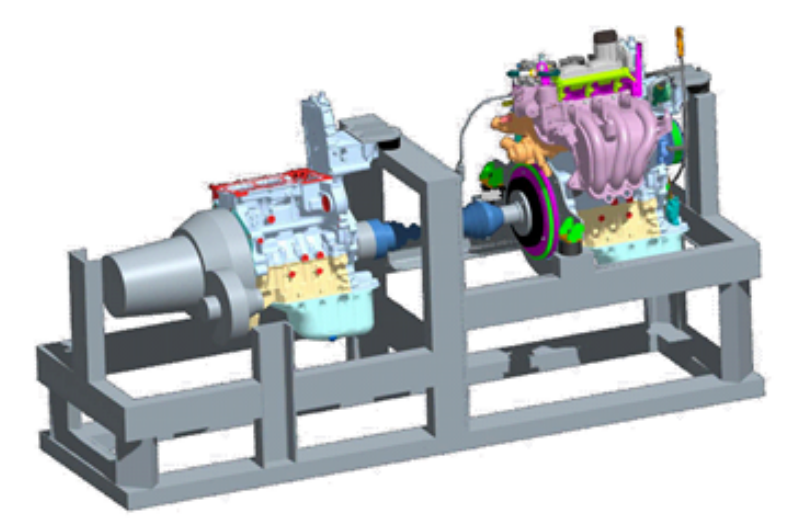
Na obrázku 4.1 je zachyceno blokové schéma zkušebního stavu s označením částí, které jsou v dalším textu podrobněji popsány s odůvodněním jejich použití.



Obrázek 4.1: Stav pro zatěžování automobilové převodovky-blokové schéma

Pro prvotní návrhy zkušebního stavu byl využit software Pro/Engineer a vznikl hrubý model ve 3D.

Rám byl sice konstruován s ohledem na co nejvyšší tuhost, avšak ta v konečném důsledku není hlavním požadavkem, neboť součásti jsou uchyceny podobně jako v reálném vozidle, a to s využitím pryžových lůžek. Konstrukce byla navržena jako svařenec z dílců, pro jejichž výrobu byl použit normalizovaný válcovaný ocelový profil U100 ČSN 425570, který vyhovuje požadavkům. Při návrhu hlavních rozměrů bylo přihlíženo k rozměrům potřebným pro zástavbu součástí podle blokového schématu a také k velikosti prostoru pro umístění stavu u dynamometru. Hrubý návrh stavu v podobě 3D modelu je zachycen na obrázku 4.2. Na tomto obrázku není zachycena skříň třecí spojky.



Obrázek 4.2: Návrh stavu- 3D model

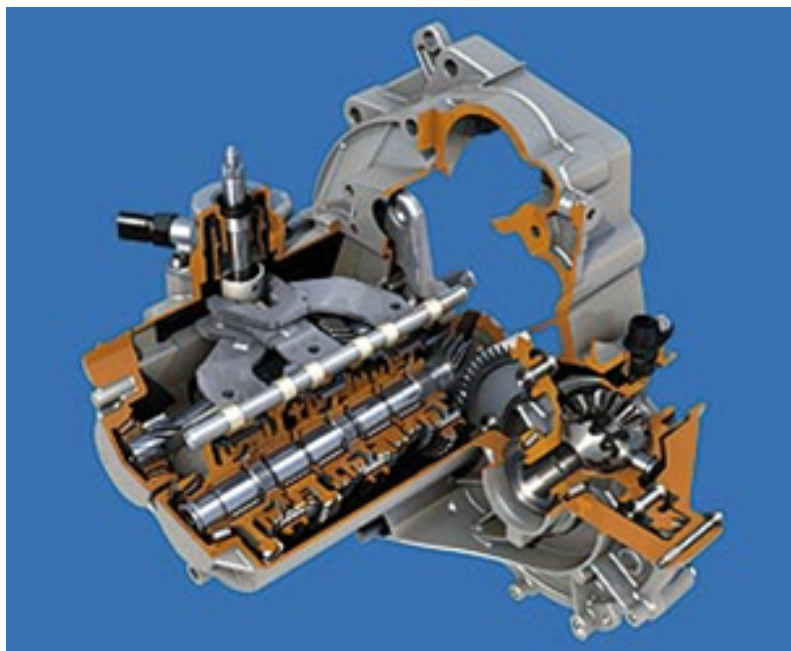
Rozměry rámu jsou následující: délka - 1850 mm, šířka - 560 mm, výška - 750 mm. Zachován je také hlavní připojovací rozměr, a to vzdálenost osy výstupní hřídele nad základovou deskou, která činí 500 mm. Pro uložení motoru a tělesa převodovky byly použity standardizované pryžové silentbloky o rozměru 60 x 40 mm se šrouby M10.

4.2.1 Převodovka - měření

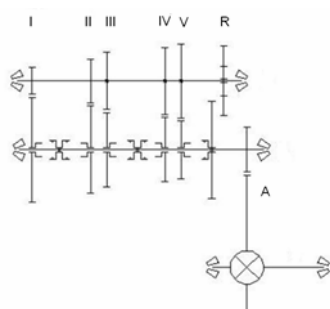
Pro zkoušení byla zvolena manuální převodovka Škoda Auto a.s. řady **MQ100**, která je reprezentantem moderně konstruovaných automobilních převodovek své kategorie.

MQ 100 (Obrázek 4.3 - Řez MQ100) je manuálně řazená, 5-ti stupňová převodovka (Obrázek 4.4a - Schéma MQ100) využívající pro převodové stupně I-V čelní šikmé ozubení. Zpětný chod je realizován přesuvným kolem s přímým ozubením. V obrázku 4.4b jsou uvedeny počty zubů kol a hodnoty převodových poměrů.

Převodovka MQ100 je navržena pro zatížení vstupní hřídele točivým moment $M_k = 100 \text{ Nm}$ (viz označení MQ100). Tato převodovka se vyrábí v několika modifikacích, které se vzájemně liší podle motorizace vozu. Zvolena byla v tomto případě modifikace s označením **NZC** určená pro motory **1,0/44kW**. U měřené převodovky došlo z praktických důvodů k zablokování diferenciálu, a tedy je stále ve stavu přímé jízdy, nikoliv zatáčení vozidla. Uchycení převodovky je provedeno na pomocný blok motoru z důvodu zachování podobnosti uložení s ohledem na tuhost sestavy blok motoru - převodovka.



Obrázek 4.3: Řez MQ100



(a) Schéma MQ100

	NZC Z2,Z1	převod
SP	74 19	3,894736842
1	51 14	3,642857143
2	43 22	1,954545455
3	47 37	1,27027027
4	47 49	0,959183673
5	43 54	0,796296296
ZP	41 12	3,416666667

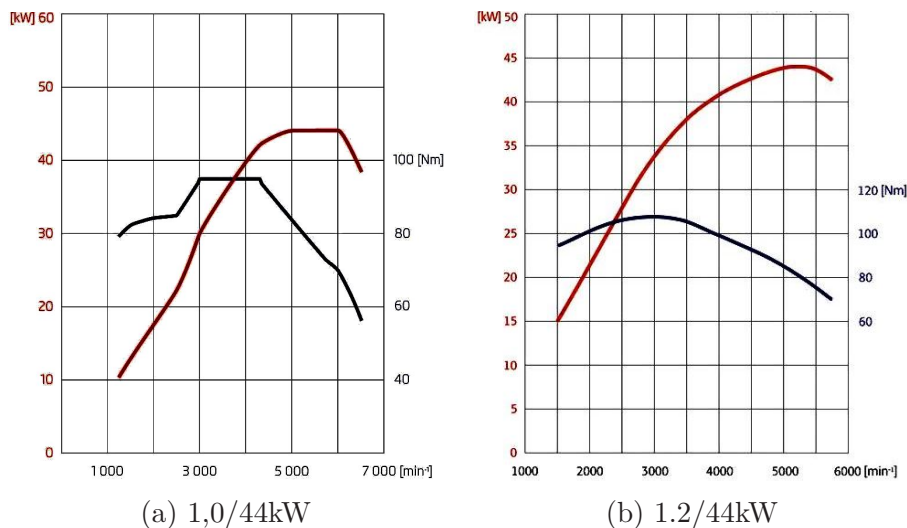
(b) Převodová čísla MQ100

Obrázek 4.4: MQ100 - parametry

4.2.2 Pohonná jednotka

Zvolená modifikace převodovky MQ100-NZC je určena pro montáž se spalovacím motorem 1,0/44kW. Je to tříválcový zážehový nepřepíňovaný motor užívaný pro vozy Škoda Citigo a VW Up!. Výkonové parametry motoru jsou znázorněny na obrázku 4.5a, a to grafem vnější otáčkové charakteristiky (VOCH). Vzhledem k požadovaným parametrům byl pro pohon zvolen motor **1,2HTP/44kW**, který vyhovuje jako alternativa 1,0/44kW. Výkonové parametry (VOCH) 1,2HTP/44kW jsou zachyceny na obrázku 4.5b.

Motor pro pohon je záměrně umístěn mimo měřenou převodovku (uchycenou na jiný blok motoru) z důvodu tepelného ovlivnění a realizace mechanického propojení.

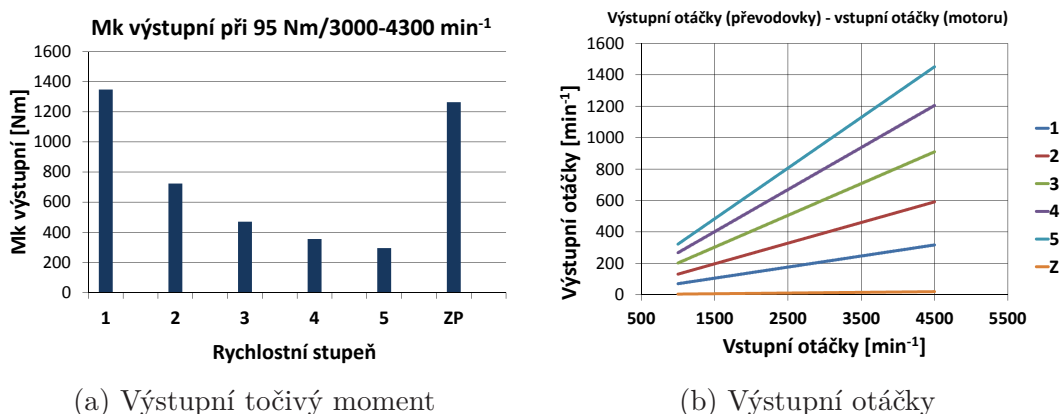


Obrázek 4.5: VOCH motorů

4.2.3 Energetické poměry

Výchozí parametry jsou otáčky a točivý moment spalovacího motoru. Oblast s největším točivým momentem $M_k = 95 \text{ Nm}$, jak vyplývá z vnější otáčkové charakteristiky motoru (1,0/44kW), se nalézá mezi **3000 – 4300 ot/min** a je tedy vhodné zabývat se výstupními parametry především v této oblasti. Převodová čísla jsou pro jednotlivé rychlostní stupně známa, lze tedy výstupní parametry orientačně dopočítat; v tomto výpočtu není uvažována účinnost převodovky.

Velikost točivého momentu a otáček na výstupu z převodovky souhrnně zachycují diagramy na obrázku 4.6. Na obrázku 4.6a je zachycen diagram maximálního výstupního točivého momentu a na obrázku 4.6b je zachycen diagram průběhu výstupních otáček.

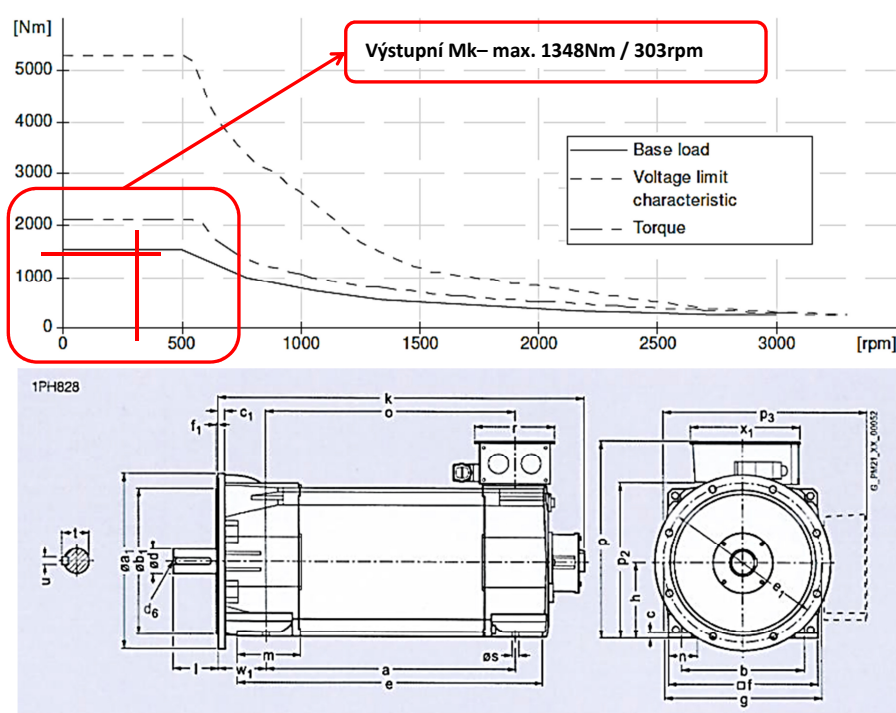


Obrázek 4.6: Výstupní parametry MQ100

4.2.4 Dynamometr

Součástí zkušebního stanoviště tvoří elektrický dynamometr **Siemens 1PH8**, který je zatěžujícím agregátem měřeného řetězce.

Dynamometru byl zvolen vzhledem k jeho vhodné charakteristice. Použitý dynamometr může vyvinout vysoký zatěžovací moment již od velmi nízkých otáček. Charakteristika zvoleného dynamometru je zachycena na obrázku 4.7, současně je zde zakreslen kritický provozní stav převodovky (maximální točivý moment na výstupu) a jak je patrné tento bod leží v pracovní oblasti pod křivkou charakteristiky a lze tedy říci, že pro měření při maximálním vstupním momentu (vzhledem ke zvoleným otáčkám) dynamometr vyhovuje (potřebný točivý moment je **1348 Nm**, tento dynamometr je schopný vyvinout moment **2120 Nm**). Na obrázku 4.7 je zachycen hrubý náčrt dynamometru (viz katalog výrobce).



Obrázek 4.7: Charakteristika dynamometru Siemens 1PH8

4.3 Zkušební stanoviště - stavba

Stanoviště¹ bylo od začátku koncipováno tak, aby umožnilo provoz co nejméně závislý na okolním technickém vybavení a sítích. Je vybaveno vlastní baterií pro provoz spalovacího motoru. V elektrickém okruhu je vložen centrální vypínač, kterým lze velice rychle spalovací motor vypnout. Další samostatné okruhy mají vlastní pojistky a jsou též napájeny z baterie. Spalovací motor je vybaven řídicí jednotkou

¹Během stavby vznikala fotodokumentace přibližující její průběh. Dále bude tato dokumentace využita při popisu podstatných částí zařízení.

upravenou pro zkoušky motorů, tato jednotka umožňuje provoz motoru bez ohledu na jinak vyžadovanou komunikaci motorové řídicí jednotky se zabezpečovacími systémy vozidel a kontrolu signálů některých snímačů.

Stanoviště je také opatřeno vlastním okruhem chlazení spalovacího motoru, které je možné dle potřeby regulovat. Ventilátor chlazení je napájen z baterie a je možné ho nechat ve stálém provozu a tak zamezit nechtěnému přehřátí motoru. Okruh napájení je opatřen pojistkou a vypínačem se signalizací.

4.3.1 Rám a uchycení hlavních částí

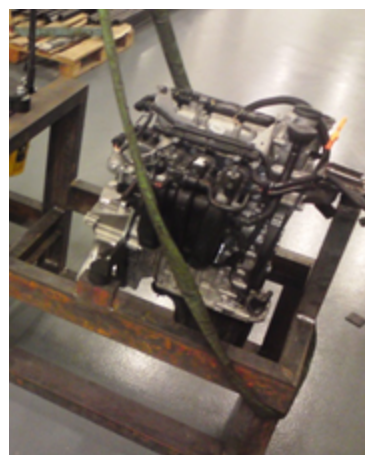
Pro uchycení motoru na základní ocelový rám byly použity tři standardní pryžová lůžka 60 x 40 [mm], z nichž jedno se nachází pod držákem na čelní straně motoru u rozvodového řetězu, další dvě jsou umístěny pod úchyty příruby na straně setrvačnicku. Ocelovou přírubu na straně setrvačnicku bylo nutné vyrobít a je navržena tak, aby byla schopna plnit funkci reakce a přenášet tak reakční síly na základní rám. Části uchycení motoru (viz popis obrázku) jsou na obrázku 4.8.



(a) Spalovací motor



(b) Pryžové lůžko



(c) Spalovací motor

Obrázek 4.8: Spalovací motor a jeho uložení

4.3.2 Části pro zajištění chodu spalovacího motoru

Vzhledem k tomu, že poháněná část stavu je spojena s dynamometrem, je propojeno i jejich ovládání. Je nutné sledovat hodnoty některých provozních veličin pro zachování bezpečnosti a předejít tak možnému poškození, nebo přímo zničení některých mechanických částí zařízení. Takovou důležitou veličinou je tlak oleje ve vnitřním okruhu mazání spalovacího motoru pro pohon stavu. Při prudkém poklesu tlaku oleje by mohlo dojít k poškození motoru, a proto je stále sledován za pomoci externího snímače tlaku propojeného s okruhem mazání motoru. Propojení mazacího okruhu a snímače je realizováno pomocí přechodky instalované místo tlakového čidla na hlavě motoru. Instalovaná přechodka je zachycena na obrázku 4.9.



Obrázek 4.9: Přechodka na hlavě spalovacího motoru

Další veličinou sledovanou pro zajištění optimálních podmínek chodu stavu a zachování bezpečnosti je teplota chladicí kapaliny spalovacího motoru. Teplota chladicí kapaliny byla sledována v blízkosti výstupu z motoru. Pro měření teploty byl využit standardní odporový snímač teploty typu Pt100 v pouzdře z korozi-vzdorné oceli. Na obrázku 4.10 je zachycena namontovaná tvarovka se zabudovaným snímačem pro měření teploty chladicí kapaliny. Na obrázku 4.10 je také patrný T-kus s připojenou hadicí vedoucí do expanzní nádoby chladicího okruhu spalovacího motoru.



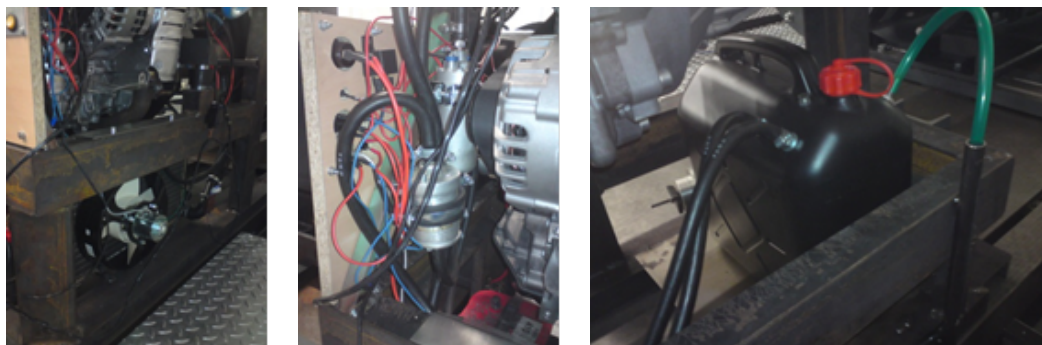
Obrázek 4.10: Měření teploty chladicí kapaliny, připojení expanzní nádoby

Vzhledem k potřebě snímání otáček a úhlu natočení je ke konci klikové hřídele motoru připevněn inkrementální snímač. Snímač je uchycen pomocí zvlášť navržených a vyrobených upínacích částí na řemenici klínového řemenu. Části pro uchycení snímače a jeho celkové umístění jsou na obrázku 4.11.



Obrázek 4.11: Zástavba snímače otáček (inkrementální snímač)

Pro funkci motoru bylo nutné doplnit také části jeho příslušenství. Vzhledem k požadavku, aby bylo možné zařízení provozovat nezávisle na vybavení laboratoře, byly doplněny systémy chlazení motoru, přívodu a filtrace paliva. Tyto systémy jsou zachyceny na obrázku 4.12.



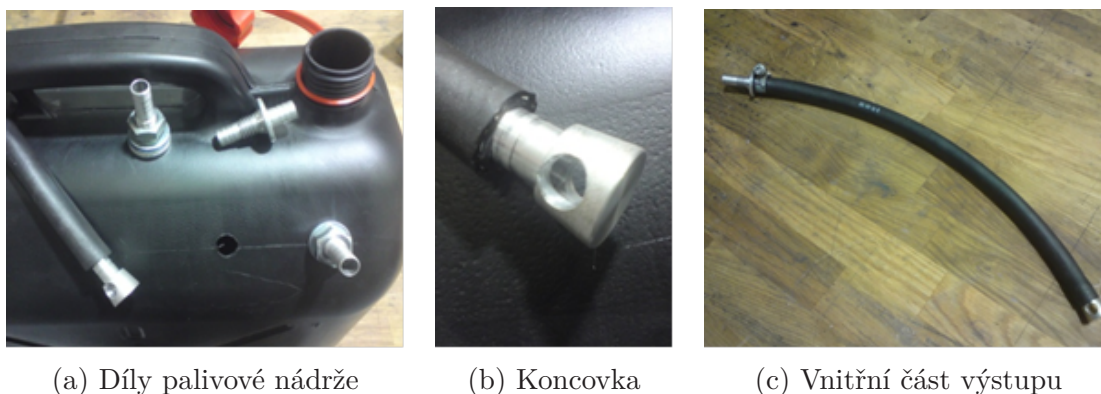
(a) Chladič s ventilaátorem

(b) Filtr a čerpadlo paliva

(c) Palivová nádrž

Obrázek 4.12: Chlazení (1. varianta) a palivový systém spalovacího motoru

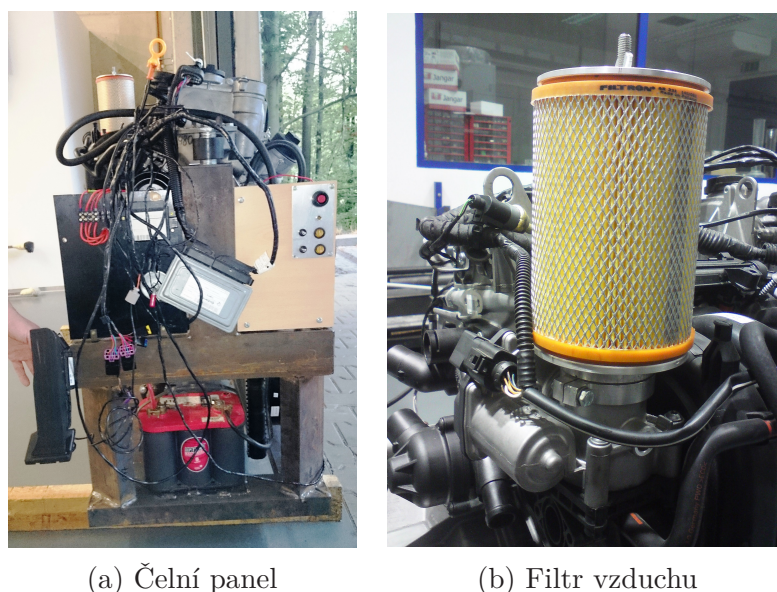
Nádrž je osazena jednoduchým palivoznakem. Na horní části nádrže je umístěn jednocestný kuličkový ventil pro přísávání vzduchu při vzniku podtlaku v nádrži. Části palivové nádrže jsou zachyceny na obrázku 4.13.



Obrázek 4.13: Nádrž paliva- součásti

Dále je zařízení vybaveno také vlastním elektrickým systémem, který zajišťuje napájení řídicí jednotky motoru, palivového čerpadla, ventilátoru chladiče a ovládání startéru pro spouštění. Elektrický okruh je vybaven odpojovačem baterie, kterým je možné také rychle motor zastavit. Elektrická zařízení jsou ovládána přes velice jednoduchý čelní panel, na němž se nacházejí vypínače ventilátoru chlazení, palivového čerpadla a spínač startéru, dále zde jsou také pouzdra s trubičkovými pojistkami. Část elektrického systému a ovládací panel jsou na obrázku 4.14a.

Motor byl osazen jednodušším filtrem nasávaného vzduchu, zachycen na obrázku 4.14b.



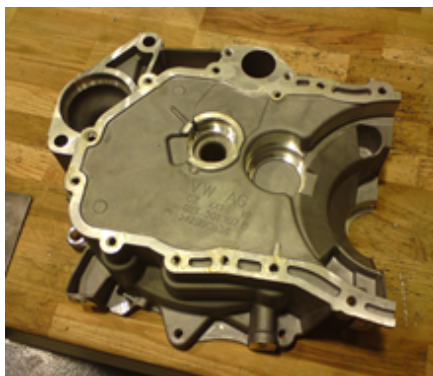
Obrázek 4.14: Panel elektroinstalace a filtr nasávaného vzduchu

4.3.3 Přestavba třecí spojky

Vzhledem k požadavku jednoduššího startu hnacího motoru, plynulého rozběhu a také možnosti řazení rychlostních stupňů během provozu, bylo přistoupeno k zástavbě třecí rozjezdové spojky. Celá část vznikla úpravou běžné spojkové skříně z

převodovky **MQ200(02T)** Škoda Auto a.s., která je kompatibilní se spalovacím motorem. Použití spojkové skříně umožnilo snadnou montáž startéru a hydraulického válce pro rozepínání spojky. Z převodovky MQ200(02T) pocházejí využitě díly-skříň spojky, rameno spojkového ložiska a vstupní hřídel.

Bylo nutné odstranit část skříně v místech určených pro diferenciál, tato úprava je zřejmá z obrázku 4.15a. Dále bylo nutné celou skříň zkrátit o 8 mm v rovině dosedající na spalovací motor viz obrázek 4.15b, tento krok byl nutný vzhledem k instalaci ocelové příruby pro uchycení motoru do rámu stavu.



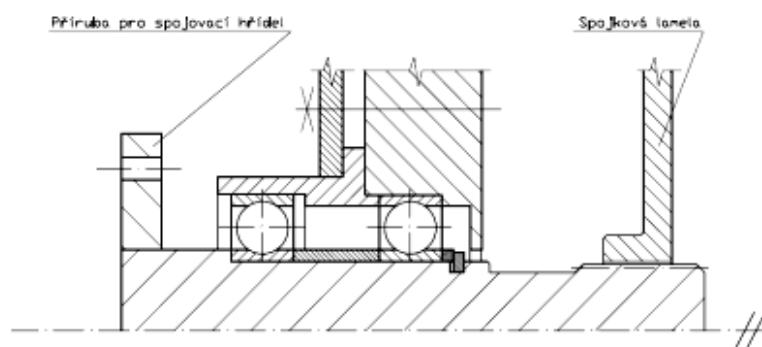
(a) Odstraněna část skříně



(b) Zkracování skříně spojky

Obrázek 4.15: Úpravy skříně spojky

Dalším důvodem pro zásah do konstrukce byla potřeba vyhotovit výstupní hřídel s přírubou pro uchycení spojovacího hnacího hřídele. Výstupní hřídel vznikl upravením standardního vstupního hřídele z již zmíněné převodovky MQ200(02T). Uložení vstupního hřídele bylo upraveno s použitím dvou ložisek **6005 2ZR ČSN 024630**. Schéma nového provedení uložení hřídele je na obrázku 4.16. Na obrázku je též schematicky znázorněno umístění spojkové lamely a příruby pro uchycení spojovacího hřídele.



Obrázek 4.16: Uložení hřídele spojky

Výstupní část upraveného hřídele byla opatřena přírubou se šesti otvory pro připojovací šrouby. Část výstupního hřídele s přírubou je na obrázku 4.17a. Příruba

je nalisována na hřídeli spolu s použitím těsného pera, proti vysunutí je na jedné straně vytvořeno osazení a na straně druhé je zajištěna pojistným kroužkem. Na obrázku 4.17b jsou části uložení výstupní hřídele a na obrázku 4.17c je zachycen pohled na již namontovanou spojkovou skříň.



(a) Výst. hřídel (b) Části uložení výst. hř. (c) Spojková skříň

Obrázek 4.17: Třecí rozjezdová spojka

4.3.4 Propojovací hřídel

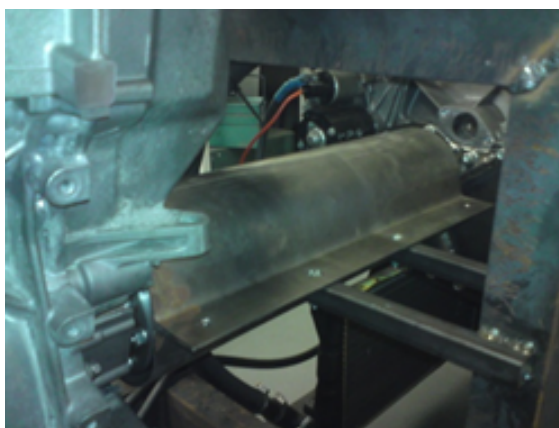
Další z částí zařízení je propojovací hřídel, který slouží k přenosu výkonu ze spalovacího motoru na měřenou převodovku. Zde bylo nutné zabezpečit možnost úhlového vyosení, aby nedocházelo k přičení a vzniku napjatosti, proto byl zvolen hřídel se dvěma klouby. Takové řešení (se dvěma homokinetickými klouby) přispívá ke stabilitě rychlostních poměrů. Byla zvolena varianta, se dvěma kuličkovými homokinetickými klouby z hnacích hřídelů automobilu. To bylo provedeno tak, že byly spojeny dva hřídele za pomoci nalisovaného převlečného dílce a zajištění lícovanými šrouby v otvorech vyvrtaných radiálně k ose rotace hřídele. Na obrázku 4.18a jsou jednotlivé použité dílce hřídele. Sestava hnacího hřídele je zachycena na obrázku 4.18b. Na obrázku 4.18c je hnací hřídel již instalován mezi výstupní hřídel spalovacího motoru a přírubu hnané části zařízení.



(a) Dílce hřídele (b) Sestava hřídele (c) Namontovaný hřídel

Obrázek 4.18: Propojovací hřídel

Závěrem byl doplněn ochranný kryt spojovacího hřídele spalovacího motoru s poháněnou převodovkou, na níž potom probíhala měření. Spodní část krytu je patrná již na předešlém obrázku 4.18c, celý namontovaný kryt je zachycen na obrázku 4.19.



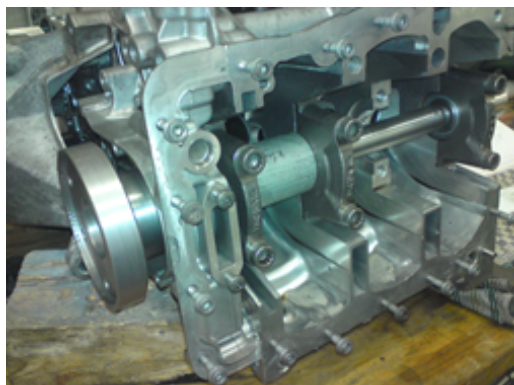
Obrázek 4.19: Kryt spojovacího hřídele

4.3.5 Blok motoru pro uchycení převodovky

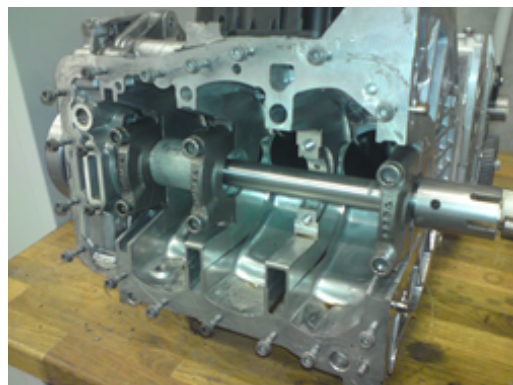
Po propojovací hřídeli následuje v řetězci hnaná část zařízení. Hnaná část se skládá z bloku motoru **1,0/44kW** a převodovky **MQ100** (v modifikaci NZC) výrobce Škoda Auto a.s.. Tato část je uchycena k rámu obdobně, tak jak je tomu v automobilu, tedy na dvou pryžových lůžkách zachycujících svislé reakce a momentové vzpěry zachycující klopný moment. Toto uchycení zaručuje tuhost sestavy velice blízkou aplikaci ve vozidle.

Blok motoru použitý pro uchycení převodovky má ponechánu hlavu válců a olejovou vanu, kliková hřídel a pístní skupina jsou odebrány. Došlo k výměně klikového hřídele za hřídel bez zbytečných rotujících hmot. Kliková hřídel je nahrazena pouze rovnou hřídelí, uloženou do dvou kuličkových ložisek vložených místo původních kluzných. Přebodovka určená pro měření je namontována přímo na upravený blok motoru.

Po vyjmutí ložiskových pánví bylo možné vložit místo nich kuličková ložiska **6005-2ZR ČSN 024630**. Vnější průměr uvedených ložisek je 47 mm a je totožný s vnějším průměrem pánví hlavních ložisek. Hřídel je uložena na dvou ložiskách, z nichž u obou jsou zajištěny vnitřní kroužky na hřídeli, vnější kroužek ložiska blíže ke vstupu je zajištěn s využitím pouzder rozepřených mezi stávající okolní částí, nebylo tudíž nutné provádět zásadní úpravy součástí. Blok motoru zůstal bez jakýchkoliv změn. Průměr vnitřního kroužku ložiska je 25 mm, proto bylo nutné hřídel vyrobít o tomto průměru. Hřídel je na vstupní straně opatřena kuželem a perem pro nasazení příruby (na obrázku 4.20c), kterou je připojena již zmíněná hnací hřídel. Na výstupním konci je hřídel uzpůsobena pro pohon vstupní hřídele převodovky. Tento konec hřídele je opatřen redukcí (na obrázku 4.20d), která je zajištěna proti protočení perem a zápusťným šroubem. Redukce zapadá do upravené střední části spojkové lamely, která je dále nasunuta na drážkování vstupního hřídele převodovky (na obrázku 4.20e). Popsané části jsou zachyceny na obrázku 4.20.



(a) Zástavba průběžné hřídele - vstupní příruba



(b) Zástavba průběžné hřídele - výstupní část



(c) Náboj vstupní příruby



(d) Výstupní část - redukce



(e) Střední část spojkové lamely

Obrázek 4.20: Hřídel v bloku motoru

Vzhledem k technickým problémům² byly nahrazeny pojistné kroužky přidržující vnitřní kroužky ložisek rozpěrkami. Rozpěrky vymezují vzdálenosti mezi pevným osazením hřídele, vnitřními kroužky ložisek a segmentem pro přenos výkonu na vstupní hřídel převodovky. Úprava je zachycena na obrázku 4.21.



(a) Sestava hřídele

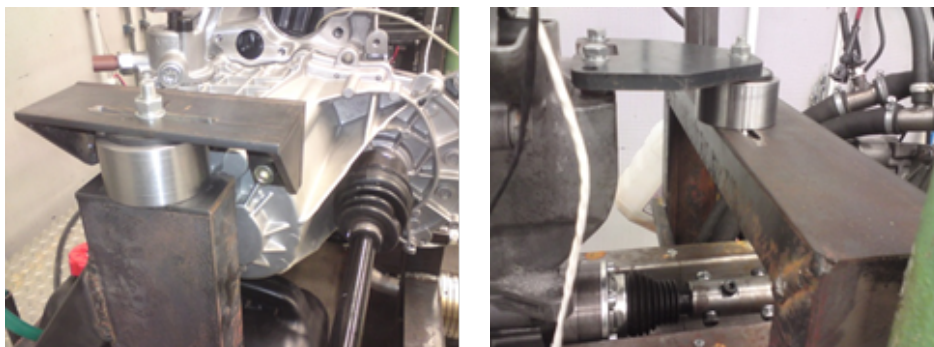


(b) Namontovaný hřídel

Obrázek 4.21: Úprava hřídele v bloku motoru

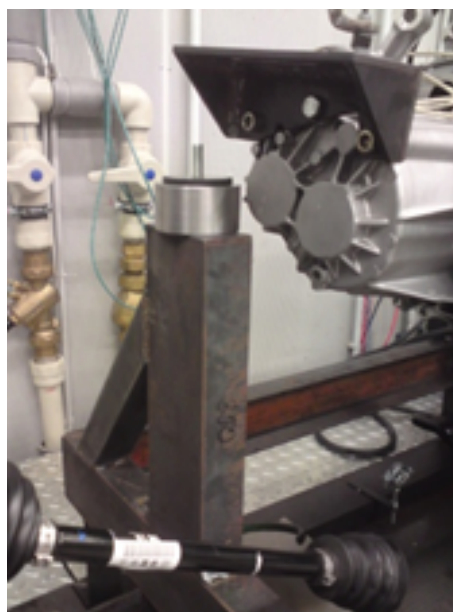
²Po krátké době provozu stavu se projevila zvýšená hlučnost v místech uložení hnací hřídele vedené pomocným blokem motoru nesoucím zatěžovanou převodovku. Ukázalo se, že došlo k posunutí pojistných kroužků přidržujících ložiska nesoucí zmíněnou hřídel. Závada odstraněna.

Blok je spolu s převodovkou připojen k rámu pomocí standardních pryžových lůžek 60/40 se šrouby M10. Pro redukci deformací lůžek, byly vyrobeny ocelové převleky, ty jsou zachyceny na obrázku 4.22³.



Obrázek 4.22: Ocelové převleky pryžových lůžek

Dále bylo přistoupeno k vyztužení svislé vzpěry, nacházející se v blízkosti dynamometru a podírající měřenou převodovku. Vyztužení je patrné z obrázku 4.23.



Obrázek 4.23: Vyztužení svislé vzpěry

Klopný moment vzniklý zatížením výstupní hřídele z převodovky zachycuje jednoduchá momentová vzpěra. Vzpěra je umístěna, stejně jako ve vozidle, na spodní straně převodovky. Její konec blíže převodovce je opatřen pryžovým lůžkem, druhý konec je pevně uchycen k rámu. Pomocí matic je možné měnit vzdálenost pryžového

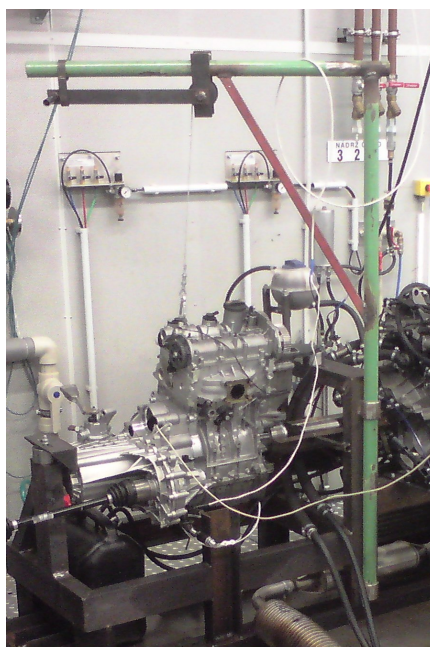
³Boční tuhost pryžových lůžek se v provozu ukázala jako nedostatečná. Při vyšších zatíženích nastávala jejich nadměrná deformace. Proto náhrada a úprava.

lůžka od rámu stavu. Aby byla zajištěna bezpečnost, byla vzpěra opatřena pojistnou smyčkou z ocelového lanka. Pomocí této smyčky by došlo v případě porušení momentové vzpěry k zachycení tažné síly - reakce vyvolané zatěžujícím točivým momentem na výstupní hřídeli. Momentová vzpěra spolu s pojistnou smyčkou je zachycena na obrázku 4.24.



Obrázek 4.24: Vzpěra

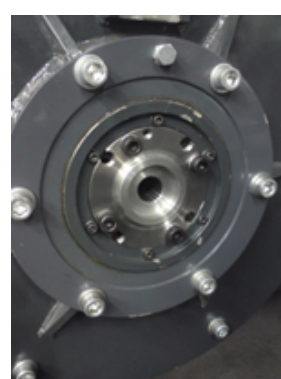
Pro snadnější montáž a demontáž zkoušené převodovky byl stav dovybaven malým zvedákem. Tento zvedák slouží k usnadnění manipulace s blokem motoru, na němž je převodovka namontována. Zvedák umožňuje také aretaci bloku motoru ve vyšší (montážní) poloze. Rameno zvedáku je otočně uloženo v držácích připevněných k rámu stavu a v případě nutnosti je možné ho jednoduše demontovat. Zvedák je zachycen na obrázku 4.25.



Obrázek 4.25: Zvedák

4.3.6 Výstupní hřídel

Pro propojení výstupu z převodovky a dynamometru byla použita originální hnací hřídel⁴ z vozu Citigo firmy Škoda Auto a.s.. Vzhledem k tomu, že ve vozidle je spojení hnací hřídele a náboje hnaného kola realizováno pomocí drážkování, byl opatřen ještě náboj kola uvedeného vozidla, ten byl upraven (viz obrázek 4.26b) pro montáž pomocí čtyř šroubů na vstupní přírubu dynamometru (viz obrázek 4.26c). Upravený náboj kola a následující montáž je patrná z obrázku 4.26.



(a) Náboj a konec hnacího hřídele (b) Upravený náboj (c) Namontovaný náboj

Obrázek 4.26: Náboj kola a uchycení k dynamometru

4.4 Měření teplot - metody, snímače, kalibrace

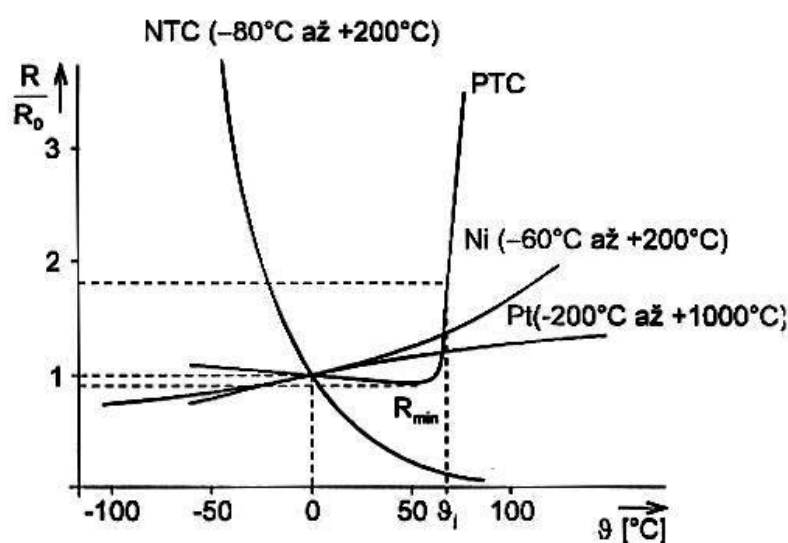
V počátku návrhu bylo zřejmé, že bude nutné vyvinout či zakoupit zařízení pro měření teplot v místech, která jsou obtížně přístupná. Ve spolupráci s Ústavem mechatroniky a technické informatiky Fakulty mechatroniky TUL bylo přistoupeno k vývoji a výrobě takového zařízení. Zařízení pro měření teplot je nutné pojímat jako celek, kde všechny části spolu navzájem souvisí a ovlivňují se. Při návrhu a stavbě tohoto zařízení vznikla určitá omezení a požadavky, kterým bylo nutné konstrukci přizpůsobit. Následující kapitoly popisují části zařízení, které je unikátní a slouží k analýze teplot na rotující hřídeli za provozu. Výsledky by měly přispět k pochopení a popisu dějů probíhajících v převodovkách a při záběru ozubených kol.

4.4.1 Snímače

Prvním a velice směrodatným prvkem měřicího řetězce, který ovlivňuje konečný výsledek, je snímač teploty. Snímač musí vyhovovat podmínkám měření, mezi něž patří například jeho zástavbové rozměry, citlivost, rychlost odezvy a vhodný princip funkce.

⁴Zablokování diferenciálu umožní zatěžovat jeden ze dvou výstupů převodovky, které se po úpravě otáčejí stejně. Tato úprava umožní použití jen jedné výstupní hřídele. Úprava je popsána v podkapitole 4.5.4.

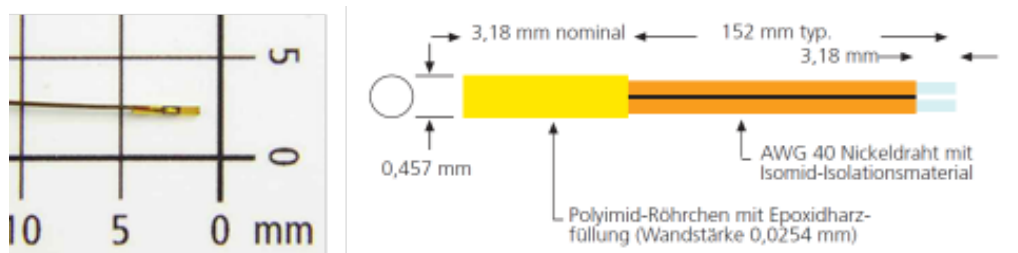
Základním dělícím znakem teplotních snímačů je jejich princip funkce a z toho vyplývající následná náročnost vyhodnocení signálu. Základními druhy jsou snímače založené na principu měření elektrického napětí a měření elektrického odporu. Snímače na principu měření elektrického napětí jsou dnes hojně využívané termočlánky. Snímače na principu elektrického odporu lze dále dělit na kovové a polovodičové. Vzhledem k nutnosti relativně jednoduchého vyhodnocení signálu, byly zvoleny snímače na principu odporu a to polovodičové termistory. Termistory v jejich nejmenších provedeních se blíží velikostí termočlánků. Měření odporu je zároveň jednodušší než vyhodnocení signálu termočlánků. Princip měření odporu přináší také výhody při potenciální přestavbě zařízení a záměně snímačů teploty za tenzometry. Odporové charakteristiky nejběžnějších druhů snímačů teploty jsou znázorněny na obrázku 4.27.



Obrázek 4.27: Odporové charakteristiky snímačů teploty

Jako nejvhodnější se ukázalo využití termistorů **NTC**, které mají vysokou citlivost v určitých oblastech své odporové charakteristiky. NTC - negastory jsou označovány snímače u nichž s rostoucí měřenou teplotou klesá jejich elektrický odpor. Zvoleny byly **NTC 2K7MCD1**, na obrázku 4.28, dodávané firmou Telemeter Electronic s.r.o.. Přibližná cena jednoho snímače je **cca 13 €**, což je příznivé oproti jiným. Modul zubu do kterého má být snímač zabudován odpovídá přibližně **2,5 mm**, a tedy jsou vyhovující také rozměry snímače, patrné z obrázku 4.28.

Rozsah měření je omezen do **cca 125°C**, teplotní setrvačnost je **cca 0,2 s**. Charakteristický odpor snímače 2K7MCD1 udávaný výrobcem je **2 kΩ** při **25°C/77°F**, při této teplotě je přesnost snímače udávána **±0,2°C**. Snímač je dobře chráněn pouzdrem z polyamidové trubice vyplněné epoxidovou pryskyřicí. Připojení k měřicímu obvodu je realizováno pomocí izolovaného vodiče. Snímač spolu s vodičem je dodáván výrobcem jako celek (teplotní sonda).



Obrázek 4.28: Teplotní snímač NTC 2K7MCD1

4.4.2 Systém pro přenos signálu

Teplotu je nutné měřit v místech na rotující součásti a zároveň ve velice omezeném prostoru. Bylo nutné navrhnout a sestavit měřicí systém, který umožní jak měření, tak záznam údajů o teplotě.

Jednou z možností je sběr dat do zařízení rotujícího společně s hřídelí. Využití takového zařízení pro měření teplot v automobilové převodovce není zcela výhodné. Jedním, i když ne hlavním, omezením je nedostatek prostoru. Dostupné jsou i miniaturizované snímací a záznamové členy, do jejichž interní paměti je možné zaznamenávat data. Pro získání dat ze záznamových členů po měření je nutné demontovat zařízení a členy vyjmout.

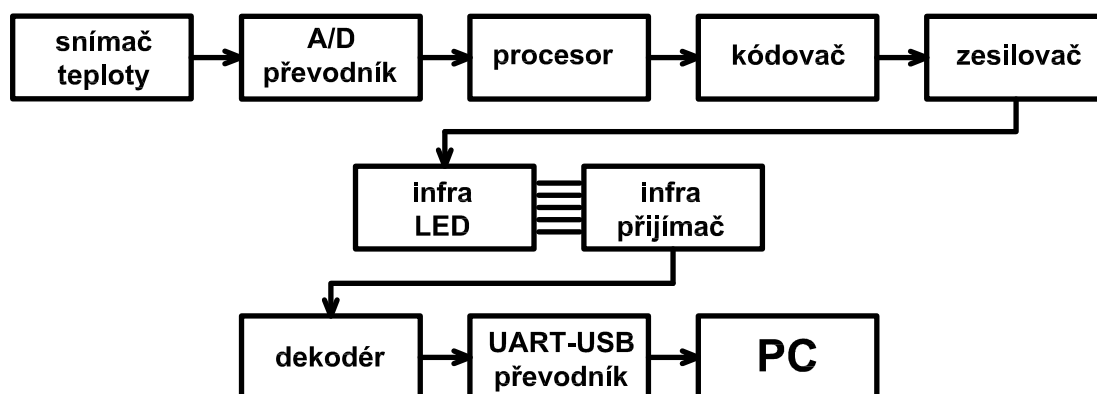
V minulosti byly voleny pro přenos signálu z otáčejících se součástí mechanická zařízení, jakými jsou rtuťové a kartáčové přenašeče, ty jsou však limitovány otáčkami a může docházet ke zkreslení signálu.

Možným řešením měření je nákup komerčně vyráběných telemetrických zařízení (např. od firmy Manner - ESA Messtechnik). Vzhledem k požadovanému počtu přenosových kanálů a specifickým požadavkům se tato varianta neukázala jako optimální. Pořizovací cena komerčního zařízení je také poněkud nepříznivá (čtyři přenosové kanály = cca 8000€).

Na základě uvedených faktů bylo rozhodnuto sestavit vlastní zařízení, které by umožňovalo přenos informací o teplotě z točícího se hřídele na statické části. Návrh a výroba zařízení proběhla ve spolupráci s Fakultou mechatroniky, informatiky a mezioborových studií TUL.

Byla zvolena optická metoda přenosu dat pomocí **infračervené diody (IR LED)**, která je umístěna uprostřed rotoru v ose otáčení hřídele. Při tomto umístění diody, neovlivňuje její rotace v axiální ose hřídele její polohu vůči přijímači, na který dopadá infračervené světlo.

Požadavkem bylo také snímání teplot ve více místech, tedy vyšší počet měřících a přenosových kanálů. Konečný počet využitelných kanálů je **16**. Aktivně využito bylo pouze 8. Blokové schéma funkce zařízení je zachyceno na 4.29.

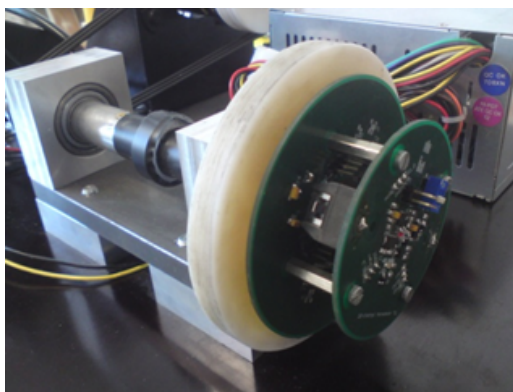


Obrázek 4.29: Schéma funkce přenosu signálu

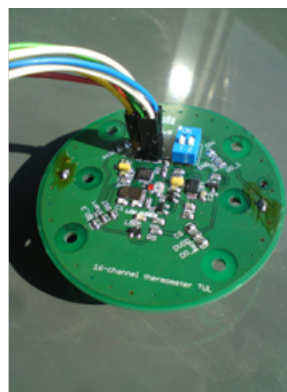
Zařízení lze rozdělit na část rotorovou (rotor) a statickou (stator). Začneme popisem funkce části rotorové, kde dochází k prvním úpravám signálu z čidel teploty. Rotorová část (viz obrázek 4.30a) se skládá ze dvou desek tištěných spojů osazenými elektronickými součástkami. Větší z desek obsahuje měřicí část a baterii, menší (čelní) potom část pro zpracování a odeslání signálu na stator. Pro určení odporu snímačů (NTC-2K7MCD1) respektive úbytku napětí na nich, jsou využity A/D převodníky. Měřicí deska je tvořena čtyřmi převodníky **ADS 1248**, což jsou sedmi kanálové 24-bitové A/D převodníky s vnitřním přístrojovým zesilovačem a nastavitelnými zdroji proudu. Díky integrovaným zdrojům proudu lze určit úbytek napětí na zapojených snímačích. Ke každému A/D převodníku je připojena čtveřice termistorů v tří-žilovém zapojení. V této aplikaci je nyní využita pouze polovina kanálů a měření probíhá pouze v 8-mi bodech. Na popsané desce se též nachází baterie velikosti **AA** o napětí **3,6 V**, která rotor napájí. Kapacita baterie je vzhledem ke spotřebě rotorové části dostačující, možná doba provozu je v řádu stovek hodin provozu.

Na rotorové části zařízení se dále nachází menší plošný spoj. Tato menší deska je spojena s již popsanou druhou částí pomocí čtyř 3-pinových konektorů, tudíž lze po odstranění čtyř hlavních úchytných šroubů lehce tuto část odejmout a baterii na spodní desce vyměnit. Menší deska obsahuje procesor, který je nezbytný pro komunikaci a řízení A/D převodníků. Procesor je typu **ATTiny 2313**, což je 8-mi bitový programovatelný mikroprocesor s vnitřní 2kb flash pamětí. Komunikace mezi procesorem a A/D převodníky je realizována jako SPI (Serial Peripheral Interface) s pomocnými signály (START, CS ad.). Komunikace (čtení a zápis) se všemi převodníky probíhá paralelně. Jelikož se předpokládá totožná konfigurace vnitřních registrů ve všech těchto obvodech, je možné připojit všechny vstupy DIN a CLK. Z jednotlivých výstupů DOUT pak sbírá nadřazený systém informace o naměřené teplotě. Procesor po komunikaci s převodníky následně předává data o teplotě

do kódovače. Data jsou odesílána po UART(Universal Asynchronous Receiver and Transmitter). Kódovač převádí signál do formátu vhodného pro odeslání pomocí IR LED. Pro kódování signálu je použit **TIR 1000**. Signál je dále zesilován pomocí tranzistoru. Posledním krokem zpracování signálu na rotorové části zařízení je jeho odeslání pomocí IR LED. Je použita **IR LED** typu **TSMF 1020**, tato LED je vysokorychlostní infračervené světlo emitující dioda využívající DH (double hetero) technologie. LED je zalisována v čířém SMD pouzdru s vypouklou čočkou. Po všech těchto operacích je možné opticky odeslat signál o teplotě v bodě umístění snímače teploty na statické části zařízení. Kompletní sestava rotoru je zachycena na obrázku 4.30a⁵. Na obrázku 4.30b je také zachycena samostatná menší deska rotoru s připojenými vodiči pro programování, je zde také patrná IR LED uprostřed desky a vypínač (modrý) pro odpojování napájení z baterie.



(a) Rotor zařízení



(b) Čelní deska rotoru s vodiči pro programování

Obrázek 4.30: Rotor zařízení pro měření teplot

Statorové části zařízení pro měření teplot jsou navrženy pro funkci přijímání a zpracování dat o teplotě vysílané IR LED z rotoru. Prvním místem kam IR signál z rotoru dopadá je infračervený přijímač. Na zařízení je použit **TFDU 4101** infračervený přijímací modul. Signál z modulu je přenášen do mikročipu **MCP 2120**, který má za úkol IR signál dekodovat. Signál je dekodován zpět do formátu UART. Aby bylo docíleno datového formátu vhodného pro následný přenos do PC, jsou data transformována do formátu USB. K tomuto kroku je využit převodník UART/USB typu **FT 232 RL**. Po převedení jsou data již ve formátu USB a tedy je možné pohodlně a jednoduše připojit zařízení pomocí USB sběrnice k PC. Na obrázku 4.31 je zachycena statorová část s viditelným IR přijímačem a připojeným USB kabelem.

⁵Sestava zobrazená v obrázku 4.32 je zkušební stav pro testování zařízení - popis je uveden na straně 44 v podkapitole 4.4.3.

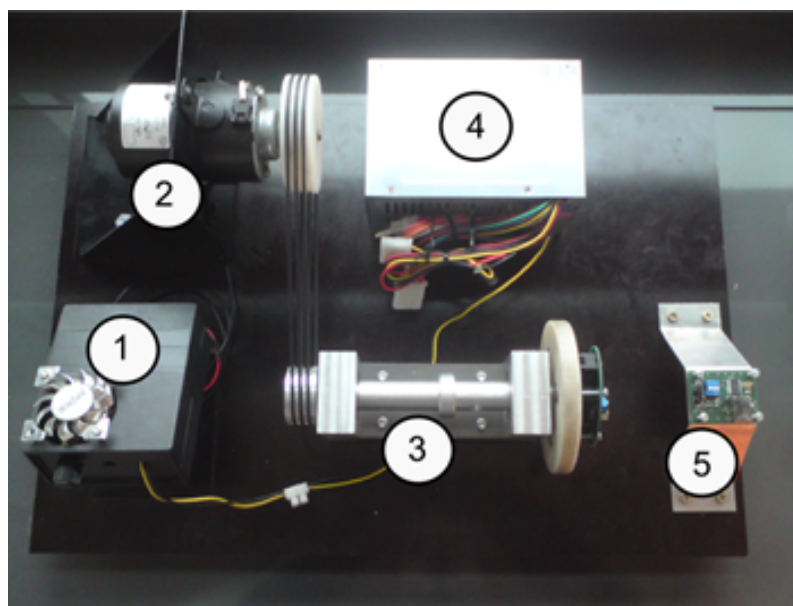


Obrázek 4.31: Stator zařízení

4.4.3 Zkušební stav pro testování zařízení pro přenos signálu z rotující hřídele

Aby bylo možné ověřit správnou funkci zařízení, a předejít tak následným problémům při konečné zástavbě, byl sestaven malý zkušební stav, který napodobuje podmínky rotace hřídele reálné převodovky. Vzhledem k relativně vysoké frekvenci otáčení rotoru zařízení bylo třeba experimentem ověřit citlivost přenosové cesty na frekvenci otáčení rotoru a případně i ověřit odolnost zařízení. Vzniklo podezření na možné ovlivnění součástí vlivem kmitání vyvolaného rotací a nevyváhou.

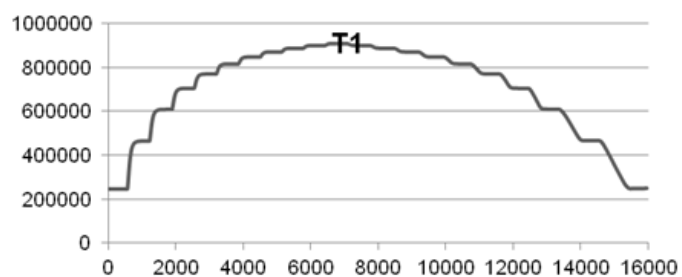
Stav je zachycen na obrázku 4.32, ke kterému se vztahuje následující komentář s označením pozic. Zařízení je poháněno stejnosměrným elektromotorem (**poz. 2**) o výkonu 55 W při napětí 12 V. Otáčky motoru lze plynule řídit regulátorem (**poz. 1**) až do maxima 2600 min^{-1} . Pomocí řemenového převodu o $i = 0,5$ až na výstupních 5200 min^{-1} . Výstupní hřídel (**poz. 3**) má nahrazovat dutý hřídel s ozubeným kolem uložený ve dvou kuličkových ložiskách. Ložiska jsou uložena v ložiskových tělesech, které představují stěny skříně skutečné převodovky. Vpravo na konci hřídele je za ložiskem na vnější straně nalisován polyamidový kotouč, na kterém je instalována rotační součást zařízení - rotor (tištěné spoje s elektronikou - vysílač signálu). Naproti této rotující části se nachází v ose rotace ustavený stator (**poz. 5**) se zařízením pro snímání signálu vysílaného z infračervené diody na rotující části. Zařízení je napájeno zdrojem stejnosměrného napětí 12 V (**poz. 4**). Při testování zařízení na tomto stavu nebyly zjištěny žádné nedostatky a potvrdila se i spolehlivost při zkoušce trvající cca 5 hodin.



Obrázek 4.32: Stav pro zkoušení funkce zařízení

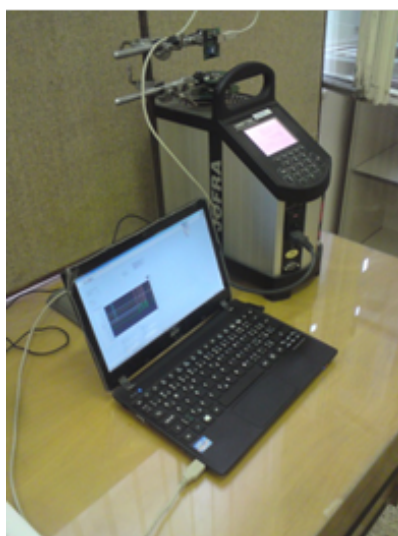
4.4.4 Kalibrace - získání kalibračních dat

Zařízení pro měření a přenos teplotních údajů bylo nezbytné kalibrovat, neboť při zpracování signálu dochází k posunutí a možnému zkreslení základní charakteristiky NTC termistorů. Pro získání kalibračních dat bylo zařízení instalováno obdobně jako při jeho běžném provozu, avšak všech osm zapojených snímačů bylo vloženo do měděné izotermické komory kalibrační pícky. Byla použita kalibrační pícka **Jofra ATC-650B** (Advanced Temperature Calibrator) zapůjčená Katedrou energetických zařízení Fakulty strojní TUL. Pícka je vybavena duálně vyhřívanou suchou kalibrační komorou. Maximální možná kalibrační teplota je 650°C (1202°F). Přesnost teplotních snímačů pícky je $+0,11^{\circ}\text{C}$ ($+0,20^{\circ}\text{F}$) při teplotní stabilitě komory $+0,02^{\circ}\text{C}$ ($+0,036^{\circ}\text{F}$). Pícka obsahuje vlastní program, ve kterém je možné zvolit počet kroků a požadované teploty jednotlivých bodů. Pro kalibraci byl zvolen počet jedenácti hodnot teploty, a to od $+25^{\circ}\text{C}$ (77°F) do $+125^{\circ}\text{C}$ (257°F), krok mezi body byl 10°C (18°F). Kalibrace probíhala ve vzestupném a sestupném sledu. Hodnoty naměřené snímačem při vzájemně odpovídajících stupních z obou sledů byly zprůměrovány. Příklad průběhu hodnot naměřených při kalibračním cyklu je na obrázku 4.33, diagram bez úprav bezprostředně po naměření.

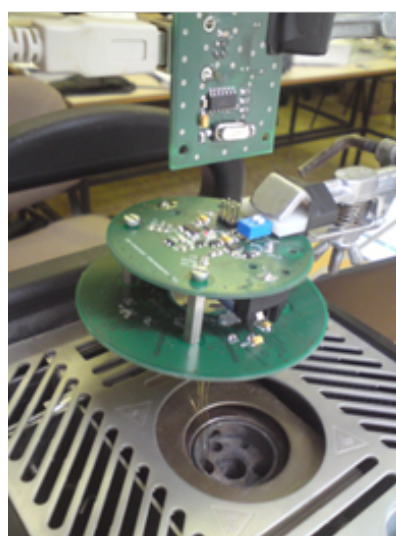


Obrázek 4.33: Průběh naměřených hodnot z kalibračního cyklu (termistor T1(dále označení 10), osa x=čas[s], osa y= u_i - (viz dále))

První bod s hodnotou 25°C (77°F) není zcela reprezentativním, neboť se nachází pod deklarovanou nejnižší možnou udržitelnou hodnotou kalibrační teploty, avšak tento předpoklad vychází z okolních podmínek měření. Při okolních teplotách nižších než je zadaná kalibrační hodnota, lze požadovanou teplotu docílit bez jakýchkoliv problémů. Časová výdrž pro ustálení na hodnotě jedné kalibrační teploty byla **3 minuty**, což je doba dostačující. Během kalibrace byla data zaznamenávána pomocí PC a následně sloužila jako podklad pro stanovení konstant. Postup výpočtu bude uveden dále. Zařízení při kalibraci je zachyceno na obrázku 4.34a a detailní pohled na stator, rotor a umístění termistorů v komoře pícky je na obrázku 4.34b.



(a) Zařízení během kalibrace



(b) Detail statoru, rotoru a termistorů

Obrázek 4.34: Zařízení pro měření teplot při kalibračních měřeních

4.4.5 Kalibrace - dopočet konstant termistorů

Pro měření teploty byly zvoleny nelineární snímače, již zmiňované NTC negastory. Ke každému jsou výrobcem udávány konstanty nutné pro linearizaci jejich odporové charakteristiky. V této kapitole by měla být objasněna metodika výpočtu konstant

a dosažení vlastní linearizace s co nejmenší chybou. Výpočty pracují s množinami hodnot konstant v určitém zadaném intervalu. Závěrem jsou porovnávány hodnoty teplot zadávaných při kalibraci jako teplot ideálních a teplot dopočtených z funkce po dosažení konstant. Konstanty funkce, u níž panuje největší shoda s ideálními kalibračními teplotami, jsou dále prohlášeny pro daný snímač teploty jako nejvhodnější a dále využívány při měření pro linearizaci odporové charakteristiky, v tomto případě dostáváme, vzhledem k počtu aktivních měřicích kanálů, množinu 8-mi sestav konstant. Konstanty jsou označeny **B**, **k**, **q**.

Termistory NTC jsou typické svou nelineární odporovou charakteristikou, kterou lze přibližně proložit vztahem 4.1.

$$R = A \cdot e^{\left(\frac{B}{T}\right)} \quad (4.1)$$

Ve vztahu 4.1 je **A**[**Ω**] konstanta, jejíž velikost je závislá na vlastnostech materiálu a tvaru termistorového tělíska. Konstanta **e** je základ přirozeného logaritmu **e=2,718**. Konstanta **B**[**K**] je teplotní konstanta, charakterizuje teplotní průběh odporu (materiálová konstanta). Parametr **T**[**K**] je absolutní teplota. Vztah 4.1 lze také napsat jako 4.2.

$$R_t = R_{25} \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25}}\right)} \quad (4.2)$$

Konstanta **R₂₅** [**Ω**] odpovídá odporu při **25°C(77°F)**. Konstanta **B**[**K**] odpovídá vztahu 4.3.

$$B = \frac{2,3026(\log R_1 - \log R_2)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (4.3)$$

Ve vztahu 4.3 se předpokládají za známé (změřené) hodnoty odporů **R₁**[**Ω**] a **R₂**[**Ω**] odpovídající teplotám **T₁**[**K**] a **T₂**[**K**]. Pro měření s co nejmenší chybou je nutné znát co nejpřesnější konstantu **B**[**K**]. Tato konstanta je specifikována výrobcem pro daný typ termistoru, avšak teplotní snímače jsou vyráběny v určitých výrobních tolerancích a nejsou tudíž všechny absolutně stejné, z těchto důvodů je výhodné dopočítat hodnotu konstanty **B**[**K**] pro každý termistor znovu.

Odpor termistoru **2K7MCD1** je deklarován **2kΩ/25°C(77°F)**, berme tuto hodnotu jako jednu ze základních pro výpočet. Vztah 4.2 lze modifikovat na vztah 4.4.

$$R_t = R_{25} \cdot e^{\left(\frac{B_x}{t_i + 273,15} - \frac{B_x}{298,15}\right)} \quad (4.4)$$

$$R_{25} = 2[k\Omega] = const., B_x \in \langle B_{min}, B_{max} \rangle, t_i \in \langle 25; 125 \rangle$$

Do vztahu 4.4 můžeme dosadit konstantu **B**[**K**] a to v hodnotách v intervalu **⟨B_{min}; B_{max}⟩**, interval je volen v okolí **B**[**K**] uváděného výrobcem, v našem případě bylo zvoleno **50** okolích hodnot, tedy hodnota **x** **∈ ⟨1; 50⟩**. Parametr **t_i**[**°C**] je hodnota ideální kalibrační teploty, dosazujeme ji postupně z intervalu **⟨25°C; 125°C⟩**

při kroku 10°C (celkem 11 možných hodnot). Z těchto hodnot parametrů lze dopočítat $R_i[\Omega]$ pro jednotlivá $B[K]$ a $t_i[^{\circ}\text{C}]$, dostáváme soubor hodnot $R_i[\Omega]$ se kterým budeme dále pracovat. Lze říci, že $R_i(B_x, t_i)$.

Jako další krok vezmeme hodnoty naměřené při odpovídajícím $t_i[K]$, označme tuto hodnotu $u_i[-]$. Hodnotu u_i musíme považovat pouze za číslo korespondující s teplotou v měřeném místě, neboť během přenosu dochází k jejich lineárnímu posunutí, což budeme dále eliminovat. Přiřadíme ke každému dopočtenému $R_i(B_x, t_i)$ odpovídající hodnotu u_i . Hodnot u_i máme prakticky 11 pro každý termistor. Hodnot R_i máme, dle $x \in \langle 1; 50 \rangle$ počtu zvolených B_x , $(x_{max} \cdot 11) = 550$. Z takto vzniklého pole hodnot lze sestavit z každých 11-ti hodnot u_i a odpovídající $R_i(B_x)$ příslušný počet grafů pro každý termistor. Na získané hodnoty bylo možné v tomto kroku použít funkci lineární regrese. Po provedení regrese jsme obdrželi odpovídající počet grafů s průběhem proloženým lineární funkcí 4.5.

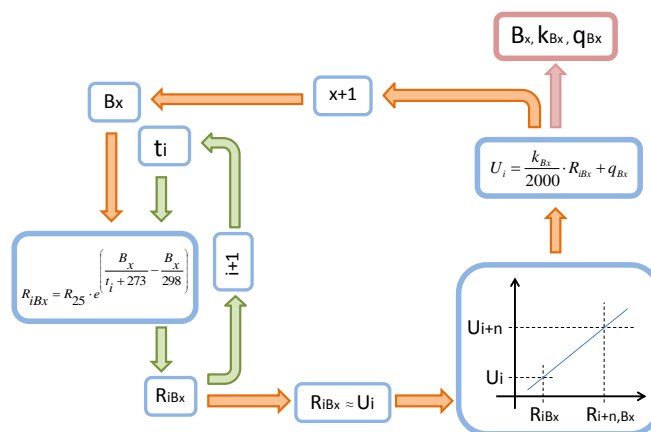
$$u_i = \frac{k_x}{2000} \cdot R_i + q_x \quad (4.5)$$

Z bodů zvolených pro kalibraci bylo možné sestavit ideální průběh teploty, tedy přímkou procházející kalibračními body. Takto získané ideální průběhy bylo možné porovnat se zpětně dopočtenými grafy, kdy pro každý byly odlišné parametry B , k , q . K porovnání došlo pro všechny kanály a rozdílné konstanty. Pro vyhodnocení nejlepší shody byla použita metoda **nejmenších čtverců**. Po porovnání všech grafů byly určeny ty, kde byla největší shoda a jejich konstanty B , k , q byly prohlášeny za nejvíce vyhovující pro další dopočet teplot z jiných naměřených dat.

Porovnávání a výpočet probíhalo cyklicky za pomoci softwaru LabVIEW. V tomto softwaru byl vytvořen program, na jehož vstupu byl soubor kalibračními daty, hodnotami u_i naměřenými při kalibračním cyklu v jednotlivých bodech. Výstupem z programu byl textový soubor obsahující nejideálnější kombinace konstant pro daný kanál, tento textový soubor byl dále používán pro měření jako "kalibrační vstupní soubor".

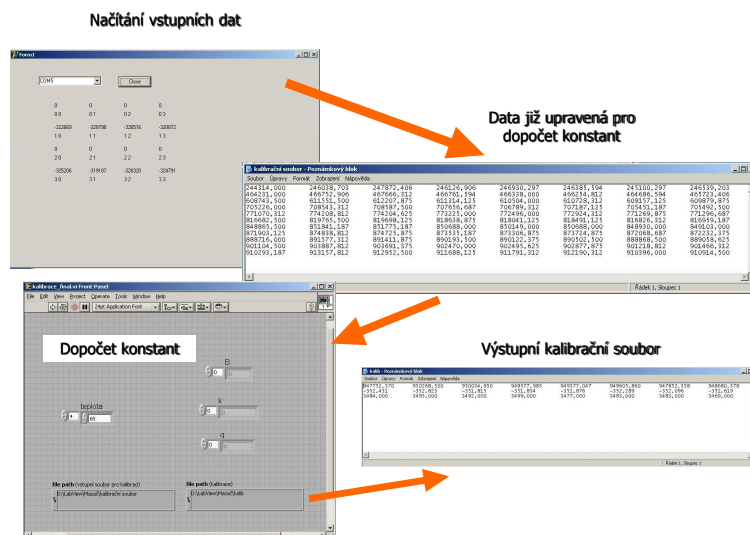
Maximální odchylka aproximované křivky a křivky "ideální" byla zjištěna na $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$, považujeme tuto hodnotu dále za maximální chybu měření.

Proces určení základní množiny sad kalibračních konstant je zachycen na obrázku 4.35, z této množiny byly určeny nejvhodnější sady, již bylo uvedeno.



Obrázek 4.35: Schéma určování konstant termistoru z kalibračních dat

Na obrázku 4.36 je zachycen přehledně proces získávání kalibračních konstant, tak jak je možné ho pozorovat z pohledu uživatele. Jsou zde zachycena okna programů a souborů, tak jak skutečně vypadají. Načítání dat pro kalibraci začíná v programu Delphi (4.36), dále je zobrazen upravený soubor s hodnotami u_i , ten dále vstupuje do programu v software LabVIEW, kde dojde k dopočtu konstant a na závěr jsou vybrané kombinace konstant zaznamenány do .txt výstupního kalibračního souboru. Postup při zpracování dat z měření je obsahem dalších kapitol.



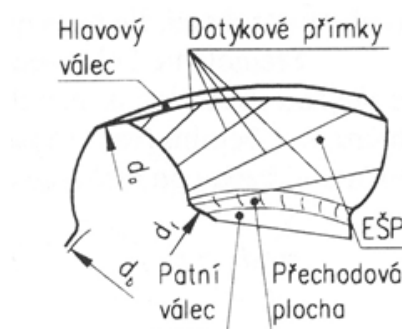
Obrázek 4.36: Průběh kalibrace

4.5 Zástavba zařízení pro měření teplot

Po sestavení zařízení, ověření funkce a kalibraci bylo možné přistoupit k finální zástavbě snímačů do měřené převodovky. Zástavba snímačů přinášela několik zásadních otázek, které bylo nutné technicky vyřešit.

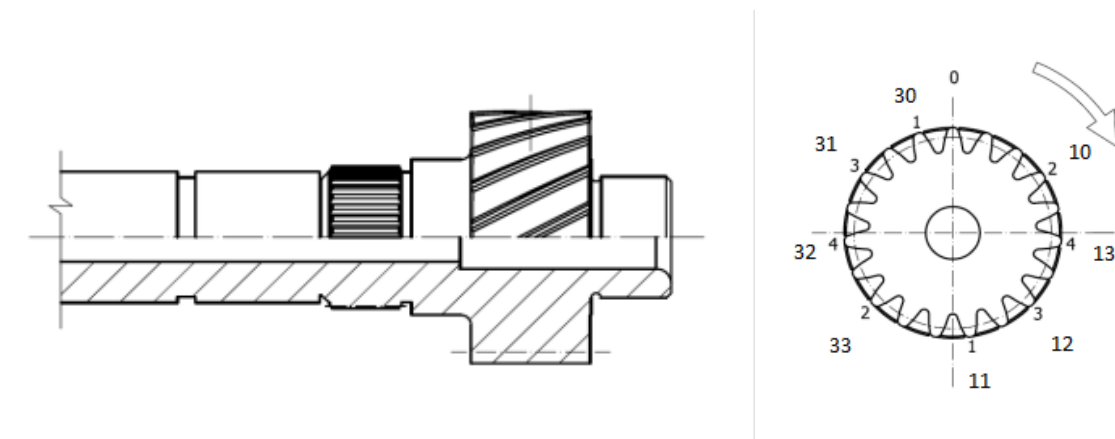
4.5.1 Umístění snímačů teploty

Při volbě vhodných míst pro měření teplot jsem vycházel z předpokladu posouvání dotykové přímky po šířce zubu. Posouvání dotykové přímky je zachyceno na obrázku 4.37[20].



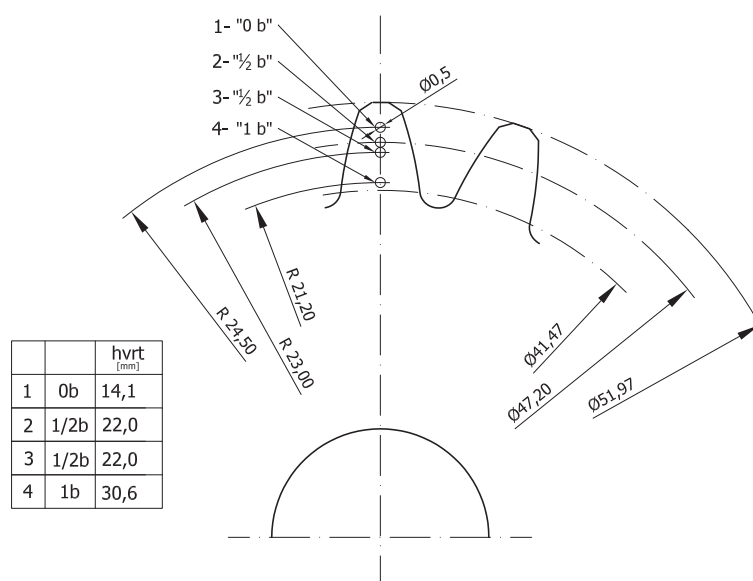
Obrázek 4.37: Pohyb dotykové přímky [20]

Záběr tedy probíhá přibližně úhlopříčně přes bok zubu. Volil jsem tedy otvory pro měření ve dvou souřadnicích vystihujících polohu otvoru po šířce a výšce zubu. Byla navržena místa zástavby celkem osmi termistorů. Vždy dva termistory jsou umístěny na stejných geometrických pozicích, ale v jiných zubech, aby bylo možné vždy porovnání shody hodnot ze dvou snímačů. Jejich rozložení je voleno vzhledem k pevnosti zubů a záběrovým poměrům, tak aby mezi dvěma zuby osazenými snímači byl vždy jeden bez úprav. Rozložení je zachyceno na obrázku 4.38. Jednociferné číslo poblíž znázorněných zubů označuje specifickou polohu otvoru pro termistor dle dále zmíněných geometrických parametrů, dvojciferné číslo je označením použitého kanálu pro termistor. Toto označení je velice důležité a bude dále zmíněno v kapitole 4.6.2.



Obrázek 4.38: Rozložení čidel teploty po obvodu ozubeného kola

Voleny jsou také průměry umístění, tedy umístění v různých výškách zubů. Tyto průměry jsou zachyceny na obrázku 4.39. Tabulka na obrázku 4.39 přiřazuje každému otvoru podle polohy po délce zubu jeho číslo v intervalu 1-4, tato tabulka také obsahuje údaj hodnoty parametru **hvert** [mm]. Parametr **hvert** [mm] není skutečnou vzdáleností snímače teploty od čelní roviny po délce zubu, ale hodnota pohybu nástroje při hloubení otvoru udávaná od pomocné virtuální technologické roviny. Význam parametru **hvert** [mm] je patrný z obrázku 4.42 v kapitole 4.5.2.

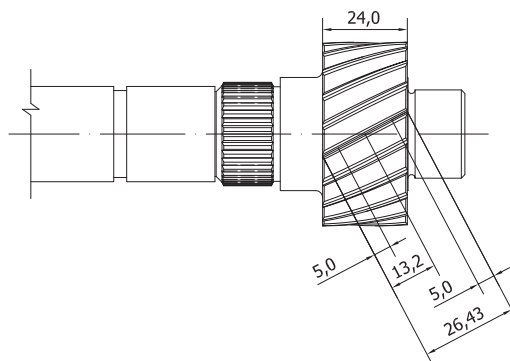


Obrázek 4.39: Rozdělení otvorů pro snímače teploty po výšce zubu

Průměry na nichž se nacházejí jednotlivé otvory pro vložení termistorů, byly voleny s přihlédnutím na pevnost zubu tak, aby vývrtem nebyla razantně ovlivněna. Zároveň bylo přihlíženo k takovému umístění termistorů, aby teploty naměřené v těchto místech byly skutečně reprezentativní a nedocházelo k přímému ovlivnění

okolními vlivy. Otvory č. 2 a 3 se liší pouze kružnicí, na níž jsou umístěny, otvor č. 2 na roztečném průměru kola a otvor č. 3 na geometrické polovině výšky zubu.

Dále jsou voleny polohy po délce zubů a právě tuto hodnotu značí index **"Xb"** (také v tabulce). Poloha **"0b"** odpovídá umístění termistoru ve vzdálenosti **cca 5 mm** od čelní roviny ozubení, stejná je i poloha **"1b"** jen s tím rozdílem, že je měřena z protějšího čelní roviny. Poloha **"1/2b"** leží v půlce šířky ozubení. Skutečné hodnoty vzdálenosti snímačů od čelní roviny jsou zachyceny na obrázku 4.40, hodnoty je vzhledem k výrobním nepřesnostem brát s jistou rezervou (tolerance polohy snímače je cca 1 mm).



Obrázek 4.40: Hloubky otvorů pro snímače teploty v ozubení

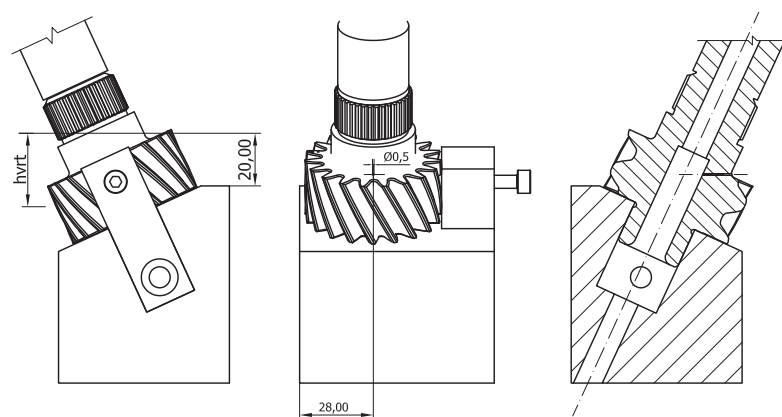
4.5.2 Hloubení otvorů pro termistory

Technologie výroby otvorů pro snímače teploty je specificky ovlivněna vlastnostmi a chemicko-tepelným zpracováním materiálu. Vzhledem k tvrdosti povrchu kola není možné přistoupit k běžnému vrtání otvorů za pomoci třískového obrábění. Pro výrobu otvorů byla zvolena technologie elektroerozivního obrábění, kdy tvrdost povrchu nehraje roli a hloubit lze průměry s dostatečnou přesností. Nevýhodou této technologie je pouze nutnost zohlednit opal elektrody a provést korekci pro dosažení požadované hloubky otvoru. Elektrody byly voleny vzhledem k požadovanému rozměru otvoru v průměru **0,5 mm**. Hloubení otvorů bylo realizováno na stroji **Shiang Yang SY-2030** - na obrázku 4.41.



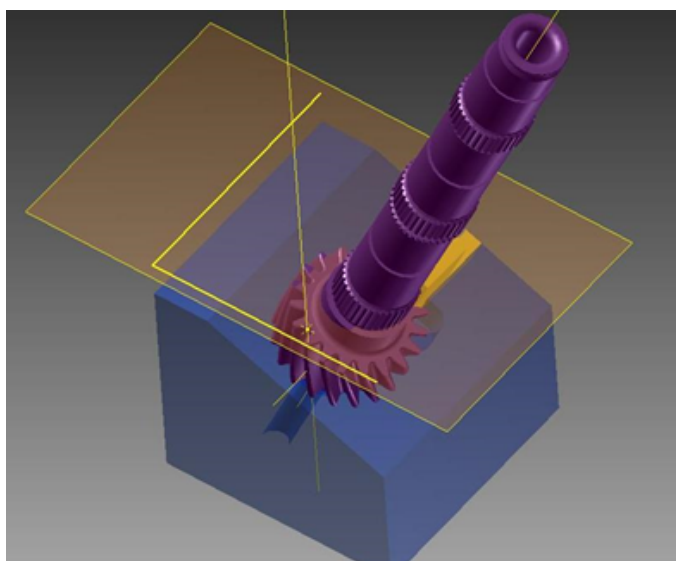
Obrázek 4.41: Elektroerozivní hloubení - stroj Shiang Yang SY-2030

Při hloubení otvorů bylo nutné co nejpřesněji zachovat požadovanou geometrii a umístění otvorů, bylo tedy nutné vytvořit model hřídele s ozubeným kolem a navrhnout pro tuto součástku vhodný přípravek pro fixaci v požadované poloze během obrábění. Pro hloubení otvorů byl navržen a vyroben přípravek, který zajišťuje hřídel ve správné poloze a to pod úhlem β ($\beta = 24, 75^\circ$) vůči podložce. Dále přípravek zajišťuje správnou polohu natočení hřídele, hřídel je aretován kuličkou o průměru **6 mm** vtlačovanou do zubové mezery. Přípravek je využíván po upnutí do univerzálního svěráku, po jeho upnutí v horizontální poloze lze hloubit i otvory radiální vůči podélné ose hřídele. Přípravek je zachycen na schématu 4.42. Parametr $h_{vrt}[mm]$ označuje délku pohybu nástroje od virtuální technologické roviny, jeho hodnoty pro všechny otvory jsou obsaženy v tabulce na obrázku 4.39 v kapitole 4.5.1.



Obrázek 4.42: Přípravek pro uchycení hřídele během hloubení otvorů pro čidla teploty

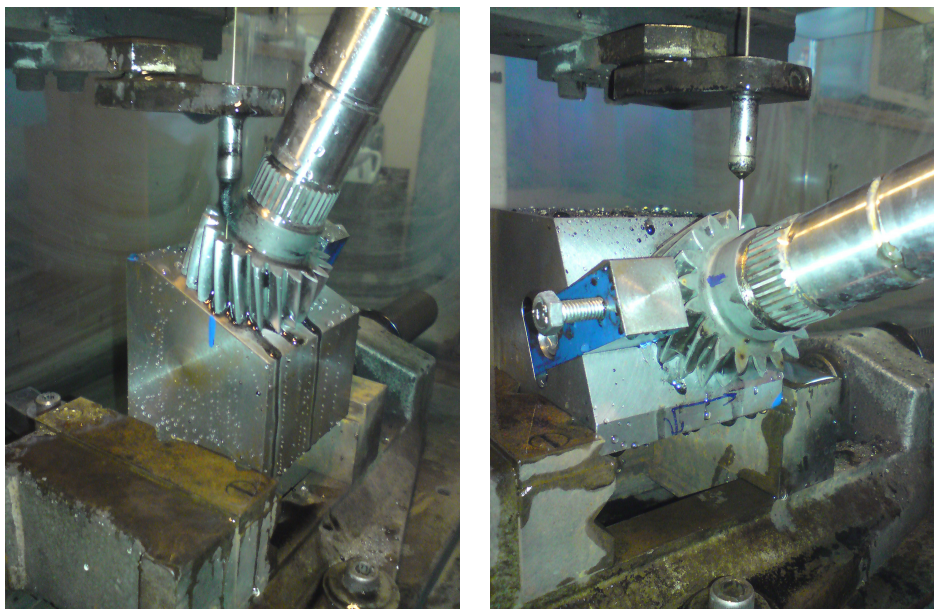
Jako základny ke správnému odměření polohy hloubených otvorů bylo použito vždy jedné z hran přípravku - schematicky zachyceno na obrázku 4.43 sestavy hřídel - přípravek.



Obrázek 4.43: Základny pro odměřování souřadnic

Hřídel byla uchycena do již popsaného přípravku a následně i s ním byla upnuta do univerzálního svěráku, který je součástí stroje pro hloubení děr. Na jedné hřídeli došlo k ověření předpokladů a podmínek pro správné hloubení otvorů, byla ověřena vhodnost geometrie přípravku a požadovaná hloubka otvorů. Během hloubení dochází k úbytkům elektrody a je tedy nutné tento úbytek kompenzovat, je nutné přičíst cca 30 procent z hloubky otvoru k jejímu absolutnímu posunutí. Při hloubení

otvorů v čelní rovině ozubení pastorku byla využita "svislá" poloha přípravku, při hloubení radiálních otvorů k ose hřídele došlo k jeho natočení. Po vyhloubení otvoru vždy došlo k pootočení hřídele v přípravku o požadovaný úhel (počet zubů) dále a aretaci pomocí vtlačení ocelové kuličky šroubem do zubové mezery. Hloubení otvorů v čelní rovině ozubení a hloubení radiálních otvorů je zachyceno na obrázku 4.44.



Obrázek 4.44: Hloubení otvorů pro termistory

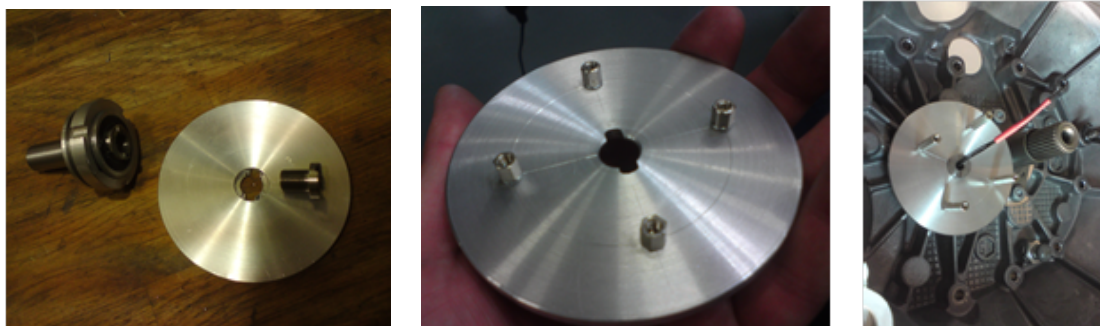
4.5.3 Úpravy pro průchod vodičů čidel teploty

Výstupní hřídel je ve skříni převodovky uložena ve dvou kuželíkových ložiskách. (Tato ložiska ač mají specifické označení dílu koncernu **VW (0AM 311 123 D)**, odpovídají rozměrově ložiskům **30 205 ČSN 02 4720**.) Pro vyvedení vodičů od snímačů teploty, bylo nutné prodloužit hřídel tak, aby procházela skrz skříň převodovky dále za vnitřní kroužek kuželíkového ložiska do prostoru, kde je umístěn rotor s elektronikou pro měření a přenos údajů o teplotě. Prodloužení bylo realizováno součástí z korozi-vzdorné oceli, která byla vlisována do osového vývrtu hřídele. Tato součástka, nazvěme ji nástavkem hřídele, je opatřena osazením pro dosažení přesné hloubky zalisování. Je také opatřen dvěma ozuby a závitem pro upevnění součástí nesoucí rotor s elektronikou. Nástavek, již nalisovaný do hřídele je zachycen na obrázku 4.45, dobře patrné jsou dva ozuby pro montáž dalších součástí.



Obrázek 4.45: Nástavek nalisovaný v hřídeli

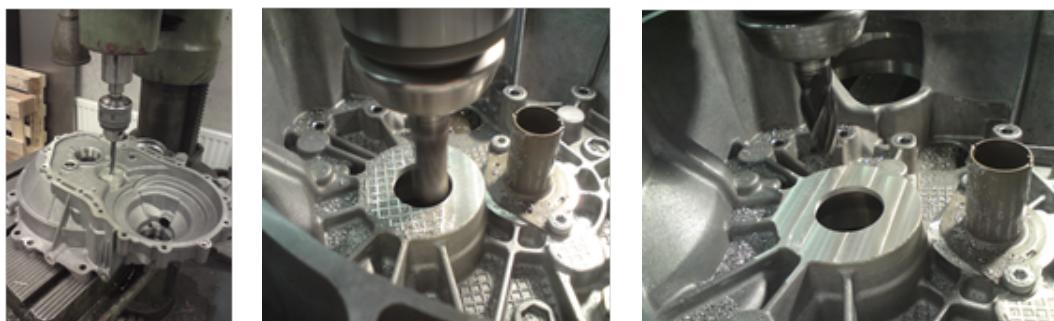
Na části nástavku, vystupující ze skříně převodovky, je instalována nosná deska rotorové části zařízení pro měření teplot. Nosná deska je součást ze slitiny hliníku kruhového tvaru, na nástavku je středěna jeho vnějším průměrem a jejímu pootočení brání dva ozuby zapadající do vybrání. Deska je zajištěna proti vysunutí šroubem z korozi-vzdorné oceli umístěného axiálně v ose nástavku. Otvor v axiální ose pojistného šroubu slouží k vedení vodičů snímačů teploty. Nosná deska je opatřena čtyřmi závit-
y do nichž jsou našroubovány sloupky pro uchycení první a druhé desky plošného spoje rotorové části elektroniky zařízení pro měření teplot (první deska = deska většího průměru, blíže nosné desky a skříně převodovky). Na obrázku 4.46 je zachycen nástavek hřídele před nalisováním procházející průchodkou (popsána v následujících odstavcích), nosná deska rotoru a pojistný šroub, výřez obrázku vpravo zachycuje nosnou desku po montáži.



Obrázek 4.46: Nosné části rotoru

Vodiče termistorů jsou vyvedeny mimo převodovku, byly provedeny úpravy i na její skříně. Oblastí úprav bylo uložení ložiska výstupní hřídele v blízkosti pastorku stálého převodu. V tomto místě byl vyvrtán otvor a upraven povrch skříně tak, aby nic nebránilo montáži dalších součástí zabezpečujících vyvedení vodičů. Vrtání a úprava povrchu blízko otvoru v místě uložení zmíněného ložiska je zachyceno na obrázku 4.47. Na tomto obrázku je zachyceno použití přípravku pro určení geome-

trického středu ložiska, úprava povrchu na který dosedají další součásti vně skříně převodovky a celkový výsledek úprav.



Obrázek 4.47: Vrtání otvoru a úpravy povrchu u ložiska výstupní hřídele

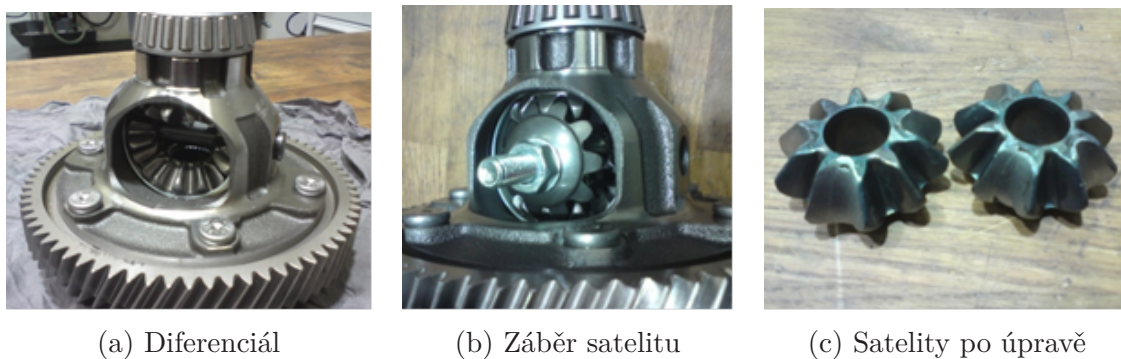
Vyvedení nástavku hřídele skříní převodovky bylo provedeno průchodkou s těsnícím kroužkem aby byla zabezpečena těsnost a nedocházelo k úniku oleje mimo skříně převodovky. Průchodka je nasunuta z vnitřní strany skříně převodovky do popsáného otvoru, osazení průchodky zde dosedá na skříně převodovky. Na straně vně skříně převodovky je průchodka zajištěna proti vysunutí pomocí matice z hliníkové slitiny tvarově podobné běžným KM maticím. Průchodka s maticí těsně před montáží je zachycena na obrázku 4.48 vlevo, uprostřed je již instalovaná průchodka ze strany kuželíkového ložiska a vpravo je pohled na průchodku z vnější strany převodové skříně. Na obrázku 4.48 je dobře patrná již nanesená vrstva těsnícího silikonového tmelu použitého pro utěsnění dosedací plochy.



Obrázek 4.48: Průchodka pro nástavek hřídele

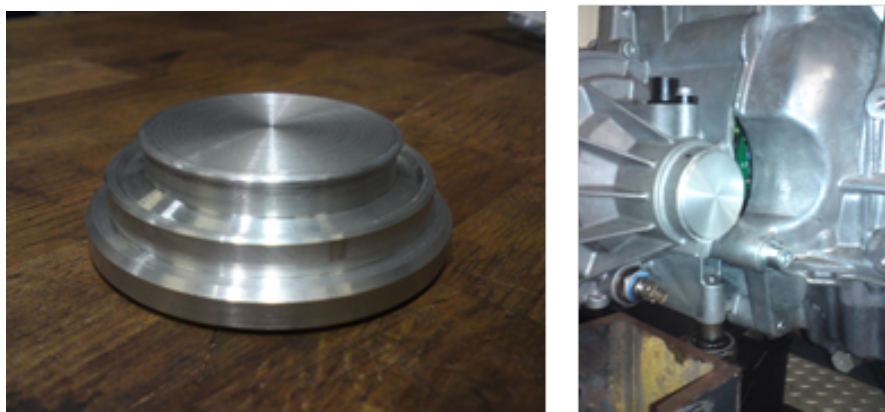
4.5.4 Další dílčí úpravy provedené na převodovce a bloku motoru pro její uchycení

Ve zkoušené převodovce byl zablokován diferenciál. Tato úprava umožňuje zatěžovat jeden výstup - jednu hnací poloosu, není třeba dvou dynamometrů pro zatěžování. Zablokování bylo realizováno vyplněním zubových mezer svary v satelitech diferenciálu. Na obrázku 4.49a je zachycen celý diferenciál, obrázek 4.49b znázorňuje záběr satelitu po vyjmutí hřídele a pootočení, na obrázku 4.49c jsou satelity po úpravě.



Obrázek 4.49: Úprava diferenciálu

Pro docílení těsnosti zkoušené převodovky byla vyrobena záslepka ze slitiny hliníku, zapadající do těsnicího kroužku v otvoru pro nasunutí kloubu hnací poloosy. Záslepka a její umístění na převodovce během měření je zachyceno na obrázku 4.50.



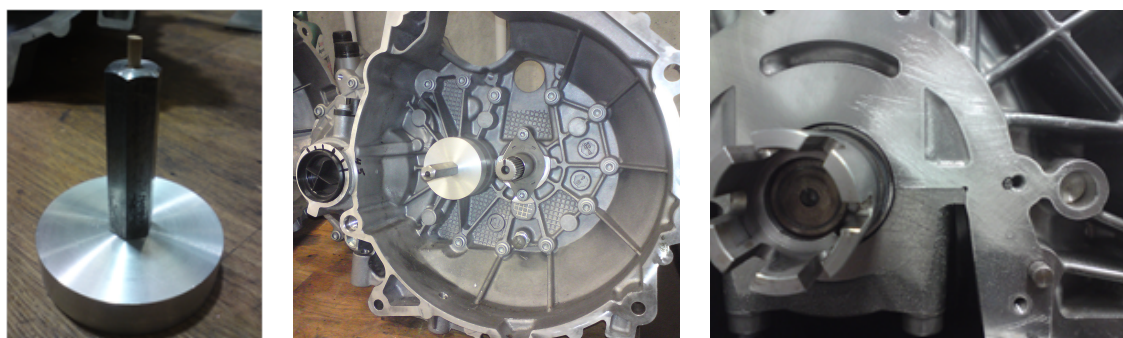
Obrázek 4.50: Záslepka výstupu hřídele

Měření teploty oleje v převodovce bylo realizováno standardním snímačem PT100 v nerezovém pouzdře umístěným v nově vyrobené olejové zátce opatřené vnitřním závitem pro jeho montáž. Umístění snímače teploty je zachyceno na obrázku 4.51.



Obrázek 4.51: Umístění snímače teploty oleje

Byl vyroben přípravek pro určení polohy statoru na pomocném bloku motoru. Po přilepení přípravku do požadovaného místa (osy rotace výstupní hřídele) převodovky stejného typu a její následné montáži k bloku zanechalo pisátko přípravku otisk určující požadovaný bod pro uchycení statické části (přijímače) zařízení pro měření teplot. Přípravek a jeho aplikace je zachycen na obrázku 4.52.



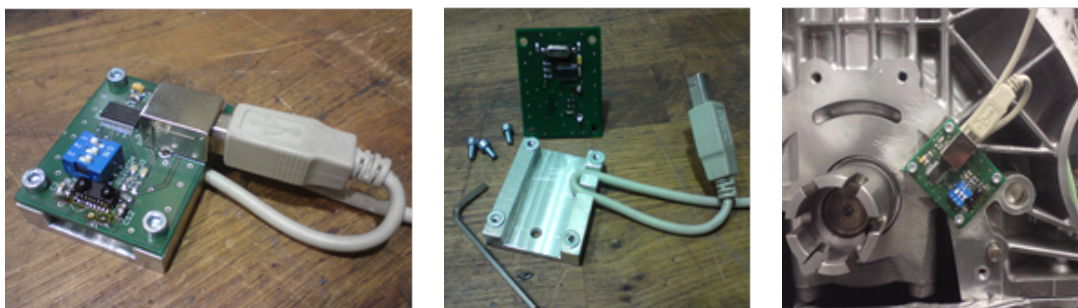
Obrázek 4.52: Přípravek pro určení místa uchycení statoru zařízení pro měření teplot

Podstatnou součástí nutnou ke správné a spolehlivé funkci zařízení pro měření teplot je úchyt statoru (přijímače). Stator je plošný spoj obsahující elektronické součástky pro příjem a úpravu signálu z rotoru. Přijímač musí být trvale umístěn přímo naproti vysílači (IR dioda).

Při konečné instalaci došlo ke změně na přijímači - byl o 90° otočen snímač pro příjem infračerveného záření. K této změně muselo dojít pro snížení zástavbové délky statoru.

Pro uchycení statoru byl po popsání úpravě funkční polohy navržen díl vyrobený ze slitiny hliníku respektující umístění elektronických součástek. Elektronická část statoru je k úchytu připevněna čtyřmi šrouby. Stator obsahuje také zásuvku USB typ B pro připojení prodlužovacího kabelu. Aby nedošlo k jeho vytržení, nebo vy-lomení zásuvky, jsou v úchytu vyfrézovány drážky pro fixaci části kabelu. Instalace

úchytu na místo, které bylo již určeno v předchozím kroku, je realizována přilepením epoxidovým lepidlem. V poslední fázi došlo k montáži samostatné elektroniky statoru. Úchyt statoru, stator a montáž je zachycena na obrázku 4.53.



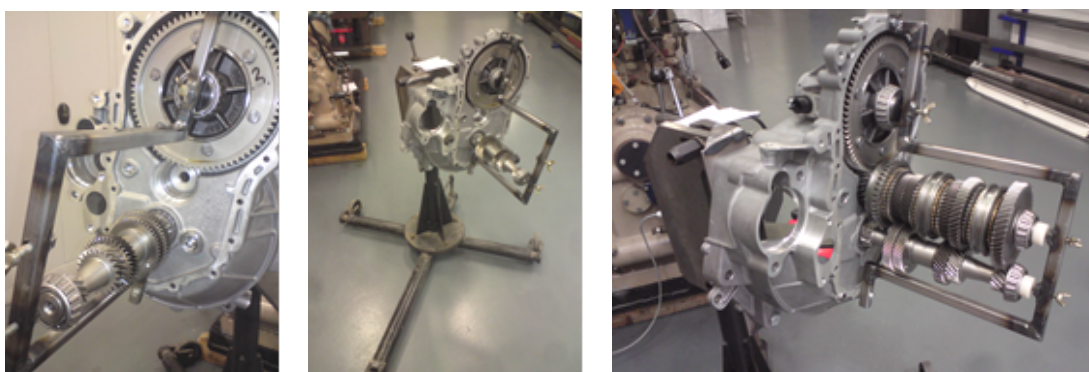
Obrázek 4.53: Stator zařízení pro měření teplot a jeho montáž

4.5.5 Montáž termistorů a rotujících částí zařízení pro měření teplot

Po úpravách a doplnění všech součástí bylo možné přistoupit k finální montáži zařízení pro měření teplot. Pro zajištění stálé polohy hřídelí převodovky při montáži, byl vyroben montážní přípravek zachycený na obrázku 4.54a.

Převodovka byla během montáže uchycena na univerzálním stojanu s upravenými připojovacími částmi. Univerzální stojan je zachycen na obrázku 4.54b.

Na obrázku 4.54c, je zachycena převodovka na montážním stojanu, kde hřídele jsou zajištěny montážním a přepravním přípravkem.



(a) Montážní přípravek

(b) Univerzální stojan

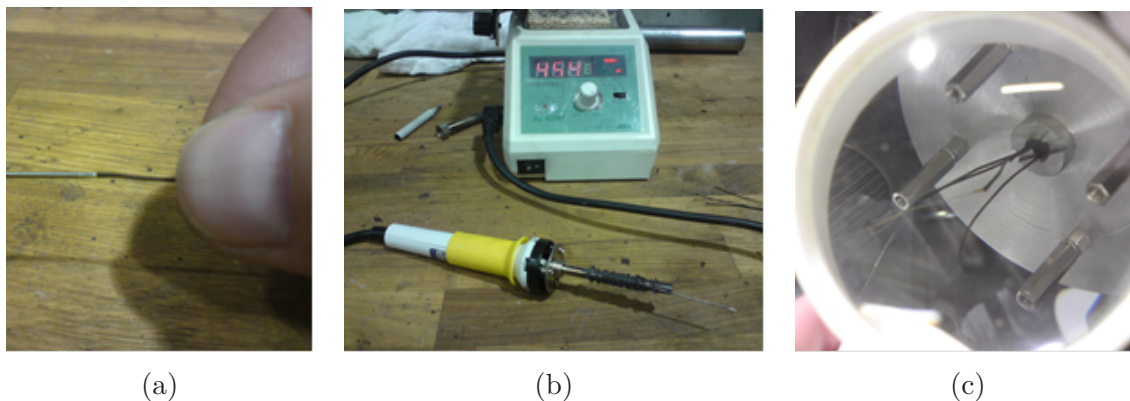
(c) Převodovka při montáži

Obrázek 4.54: Uchycení převodovky a fixace hřídelí při montáži

Ve stísněném prostoru bylo nutné snímače a jejich kabely pro připojení co nejšetrněji navést do konečné polohy. K tomuto účelu bylo využito naváděcích kabelů. Bylo nezbytné upravit jejich konce tak, že byla povytažena izolace mimo vodič a tato část byla zahřáta a natvarována horkou jehlou.

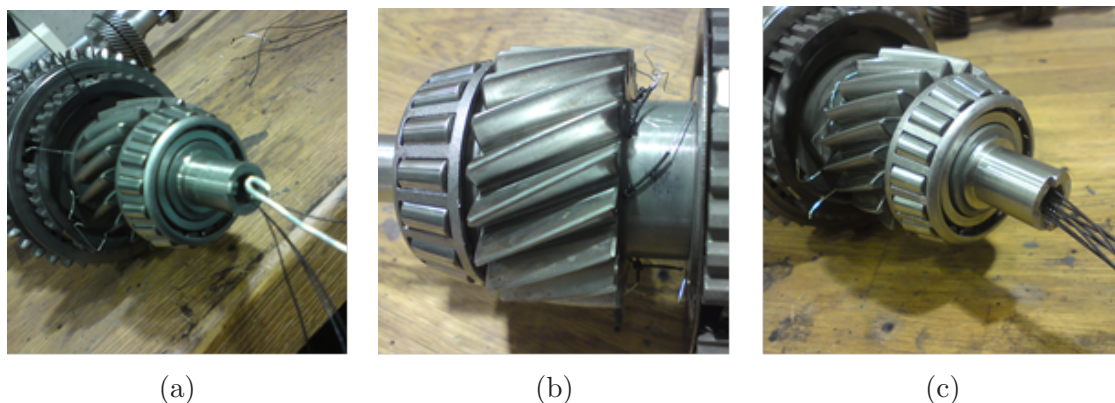
Po výše uvedené operaci měly konce zaváděcích kabelů kuželovitý tvar, termistory bylo možné do tohoto rozšíření lehce vložit a tím je s kabelem spojit.

Tvarování konců zaváděcích kabelů je zachyceno na obrázku 4.55a, jehla ohřívaná topným tělesem pájecí stanice je na obrázku 4.55b a spojení termistoru s koncem zaváděcího kabelu je na obrázku 4.55c.



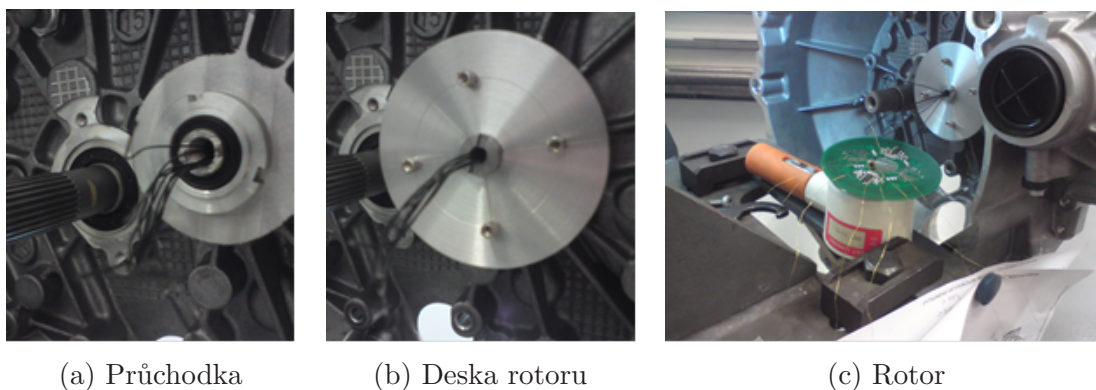
Obrázek 4.55: Tvarování konců zaváděcích kabelů

Dále bylo možné aplikovat zaváděcí kabely do otvorů v upravené hřídeli. Došlo k protažení kabelů skrz radiální otvory v blízkosti pastorku do dutiny hřídele a dále v axiálním směru skrz nástavek. Protažení zaváděcích kabelů je zachyceno na obrázku 4.56a, zajištění proti vytažení u pastorku pomocí uzlu je na obrázku 4.56b, celkové umístění zaváděcích kabelů je na obrázku 4.56c.



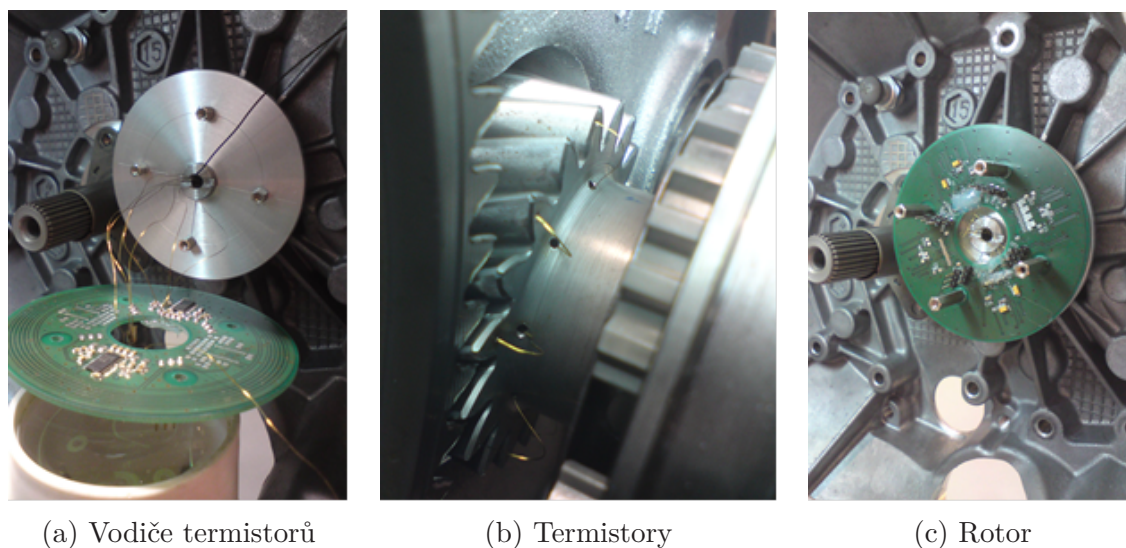
Obrázek 4.56: Instalované zaváděcí kabely

Následovalo vložení všech hřídelů do skříně převodovky a zajištění jejich polohy přípravkem. Vystupující část nástavku s montážními kabely a zřetelně viditelnou průchodkou ve skříně převodovky lze spařit na obrázku 4.57a. Dále byla provedena montáž nosných částí rotoru, tedy nosné desky, sloupků a zajišťujícího šroubu - zachyceno na obrázku 4.57b. Připravený rotor k montáži je zachycen na obrázku 4.57c.



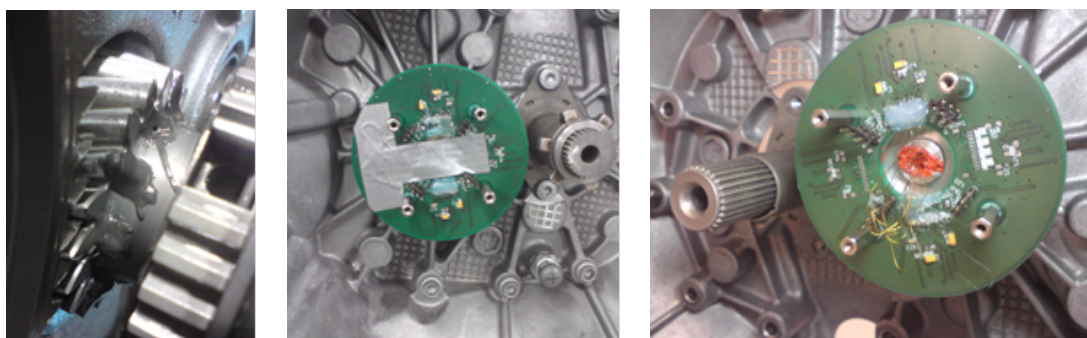
Obrázek 4.57: Příprava k zavedení termistorů

Termistory byly postupně vkládány do upravených konců zaváděcích kabelů a jejich pomalým posouváním protaženy až k otvorům v čelní rovině ozubení pastorku. Jednotlivé termistory byly předem označeny nálepkou s číslem jejich kanálu, pořadí zasazení termistorů do otvorů bylo přesně dané. Postupné vkládání vodičů je zachyceno na obrázku 4.58a, termistory vložené do otvorů v čelní rovině ozubení pastorku jsou na obrázku 4.58b a již uchycená spodní část rotoru je na obrázku 4.58c.



Obrázek 4.58: Montáž termistorů

Fixace termistorů a jejich vodičů na čelní rovině pastorku byla realizována pomocí epoxidového lepidla - na obrázku 4.59a. Volné částí vodičů na rotoru byly zajištěny pomocí průmyslové lepicí pásky viz obrázek 4.59b. Těsnění a fixaci vodičů termistorů procházejících osovým otvorem hřídele zabezpečuje vysokoteplotní silikonový tmel (červený), viz obrázek 4.59c.



(a) Fixace termistorů

(b) Fixace vodičů

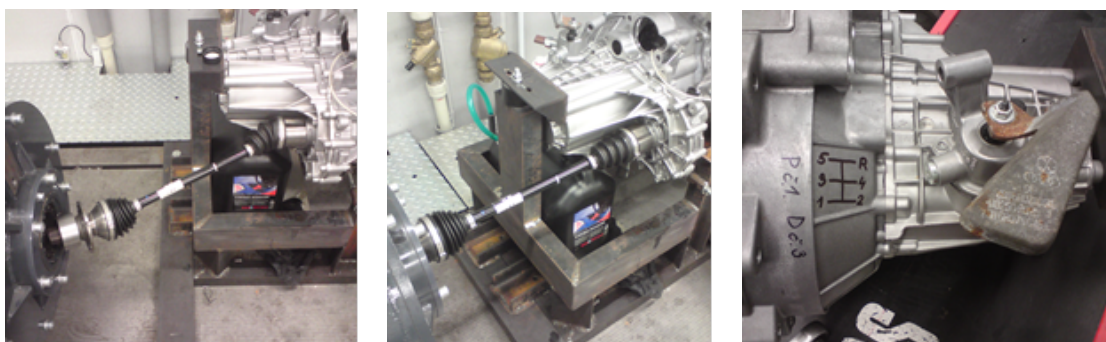
(c) Těsnění v nástavku

Obrázek 4.59: Fixace termistorů a vodičů

4.5.6 Závěrečná montáž zařízení

Závěrem byla osazena elektronická část rotoru a tím byla dokončena montáž zařízení pro měření teplot. Hřídele již nebylo možné demontovat, a proto byla zbylá část převodovky sestavena v opačném sledu než jak je to běžné. Demontáž a montáž převodovky prováděla odborná firma, a tedy předpokládám dodržení všech montážních tolerancí. Převodovka byla naplněna převodovým olejem 75W-80 (G052527A2) dle specifikace. Nebyl použit originální olej Škoda Auto a.s..

Převodovka byla uchycena k bloku motoru a byla nastavena poloha vůči rámu stavu, dále došlo k montáži výstupní hřídele, a tedy k propojení s dynamometrem. Montáž hřídele bylo nutné provést při vychýlení dynamometru a jeho následném posouvání do funkční polohy - na obrázku 4.60a. Kompletní připojení dynamometru je na obrázku 4.60b. Na převodovku bylo vyznačeno rozmístění převodových stupňů - viz obrázek 4.60c, aby byla minimalizována možnost záměny rychlostního stupně při manuálním ovládání stavu.



(a)

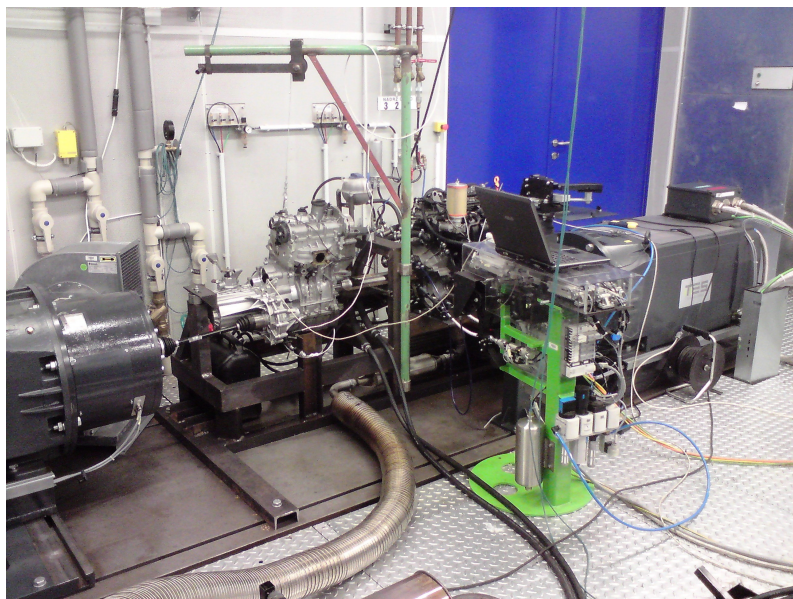
(b)

(c)

Obrázek 4.60: Výstupní hřídel, schéma řazení

Bylo připojeno zařízení pro ovládání spojky (a při automatických zkouškách i k řazení rychlostních stupňů), snímače dalších teplot a veličin (teplota oleje převodovky, teplota chladicí kapaliny na výstupu spalovacího motoru, teplota okolí, tlak

oleje v motoru, inkrementální snímač otáček motoru). Chlazení motoru bylo připojeno k externímu okruhu, neboť vestavěný chladič se ukázal jako ne zcela dostačující. Celkový pohled na zařízení již ve finální podobě je na obrázku 4.61.



Obrázek 4.61: Zařízení - celkový pohled

4.6 Měření na zařízení

4.6.1 Zátěžné režimy

Měření teplot probíhala za provozu v definovaných zátěžných režimech. Pro dopočet parametrů byl uvažován interval otáček motoru $3000 - 4300 \text{ min}^{-1}$, v tomto intervalu byl předpokládán maximální dosažitelný točivý moment motoru, tedy 95 Nm (viz VOCH 1,0/44kW).

Jednotlivé zátěžné režimy specifikují dva údaje a to točivý moment na výstupní hřídeli (momentem na dynamometru) a otáčky hnacího motoru (vstupní otáčky do převodovky). Velikost točivého momentu je procentuální částí z maximálního dosažitelného momentu při dodávaném maximálním točivém momentu motoru (1.0/44kW Citigo). Byly zvoleny hladiny na úrovni zatížení **0%, 25%, 50%, 75%**. Všechny hladiny zatížení byly dále měřeny při třech hodnotách vstupních otáček, a to **3000 min^{-1} , 3650 min^{-1} , 4300 min^{-1}** . V uvedených režimech bylo provedeno měření při zařazených všech pěti rychlostních stupních (I-V). Z tabulky 4.1, jsou patrné režimy měření při prvním rychlostním stupni, pro další rychlostní stupně existují tabulky obdobného charakteru, celý přehled zátěžných režimů je v příloze A.1.

I.st. $I_c = 14,18$	n motoru [min^{-1}]					
	3000 [min^{-1}]		3650 [min^{-1}]		4300 [min^{-1}]	
zatížení	Mk výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	Mk výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	Mk výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]
0%	0,00	211,45	0,00	257,26	0,00	303,07
25%	336,96	211,45	336,96	257,26	336,96	303,07
50%	673,93	211,45	673,93	257,26	673,93	303,07
75%	1010,89	211,45	1010,89	257,26	1010,89	303,07

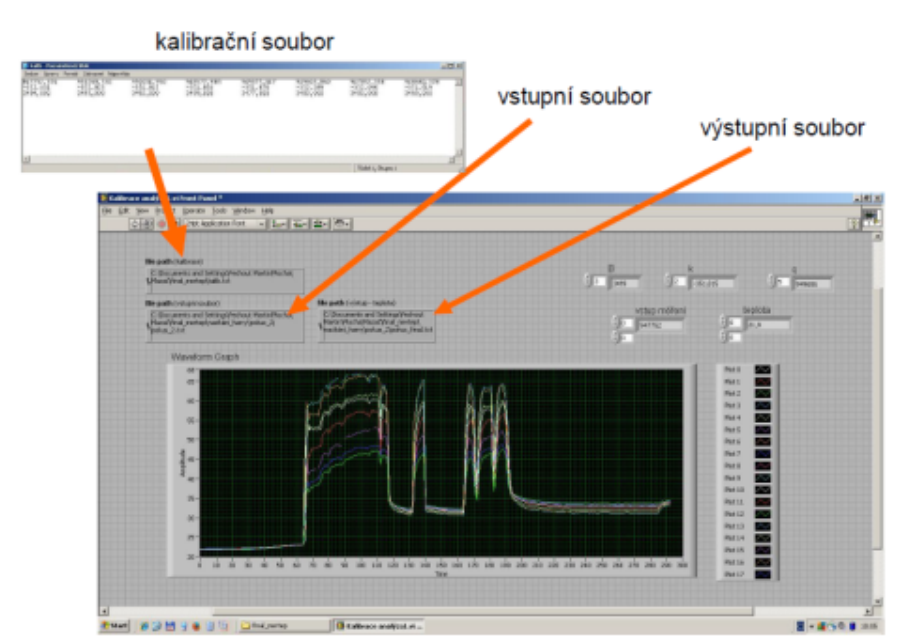
Tabulka 4.1: Zátěžné režimy - I.st

Každému z bodů měření, specifikovaný Mk_{vst} a n_{vst} a zařazeným rychlostním stupněm, bylo přiřazeno číslo, čísla byla přidělována podle pořadí při měření. Měření postupovalo od IV. rychlostního stupně, pro počáteční měření byl výhodný, ne příliš vysoký výstupní moment a vhodné výstupní otáčky. Celkem bylo provedeno měření při **64 režimech** (ne všechny byly ale použity pro zpracování výsledků). Zátěžné režimy probíhaly vždy po dobu **15 min**.

4.6.2 Popis vyhodnocování

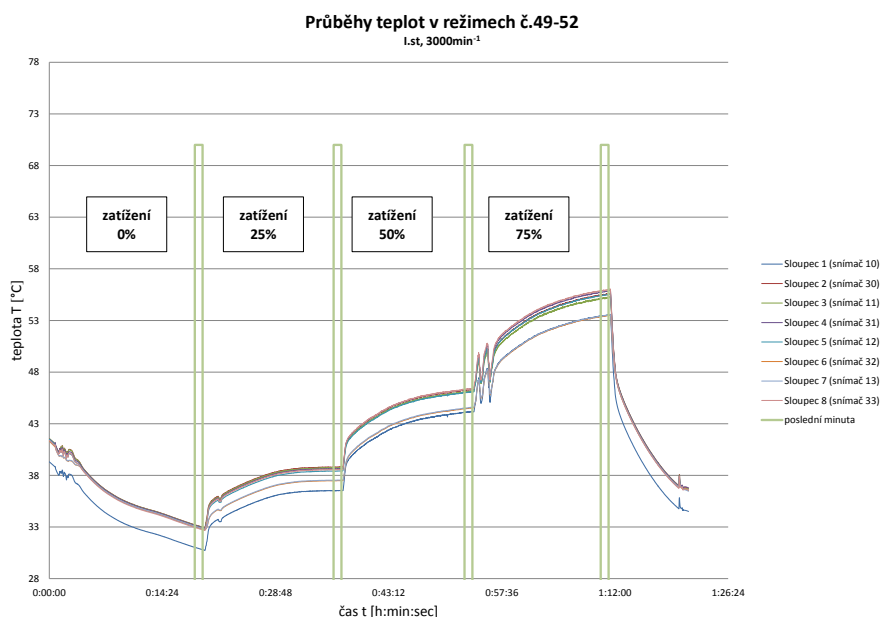
Naměřené údaje o teplotách na ozubení pastorku byla zaznamenávána do PC pomocí programu vytvořeného v prostředí Delphi. Data byla v podobě textového souboru, jehož struktura byla šestnáct sloupců čísel, kde každý sloupec odpovídá údajům z jednoho termistoru. Tato data ještě nejsou přímou hodnotou teploty, ale pouze jí odpovídají. Jeden datový soubor vždy odpovídá čtyřem po sobě jdoucím hladinám zatížení při konstantních vstupních otáčkách.

Data z měření bylo nutné převést pomocí programu v softwaru LabVIEW na hodnoty teplot. Vstupy do zmíněného programu byly soubor s kalibračními konstantami pro jednotlivé termistory a soubor s daty z měření. Výstupem z programu byl opět textový soubor, ale už se skutečnými hodnotami teplot naměřenými termistory. Se souborem obsahujícím teploty se dá již pracovat běžným způsobem. Postup při získávání výstupního souboru s hodnotami teplot je zachycen na obrázku 4.62.



Obrázek 4.62: Vyhodnocování

Výstupní soubory zachycují teplotu ozubení vždy při čtyřech hladinách zatížení, konstantních vstupních otáčkách a stálém zařazeném převodovém stupni. Pro názornost je na obrázku 4.63 zachycen graf průběhů teplot pro $I.st/3000min^{-1}$, režimy na grafu mají přidělena čísla 49-52, další grafy jsou obsaženy v příloze A.2.



Obrázek 4.63: Průběh teplot- $I.st/3000min^{-1}$

V průběhu vyhodnocování došlo k operacím (přesouvání, mazání a transpozici) některých částí naměřených dat. Bylo tudíž nutné vnést jasný pohled na pořadí

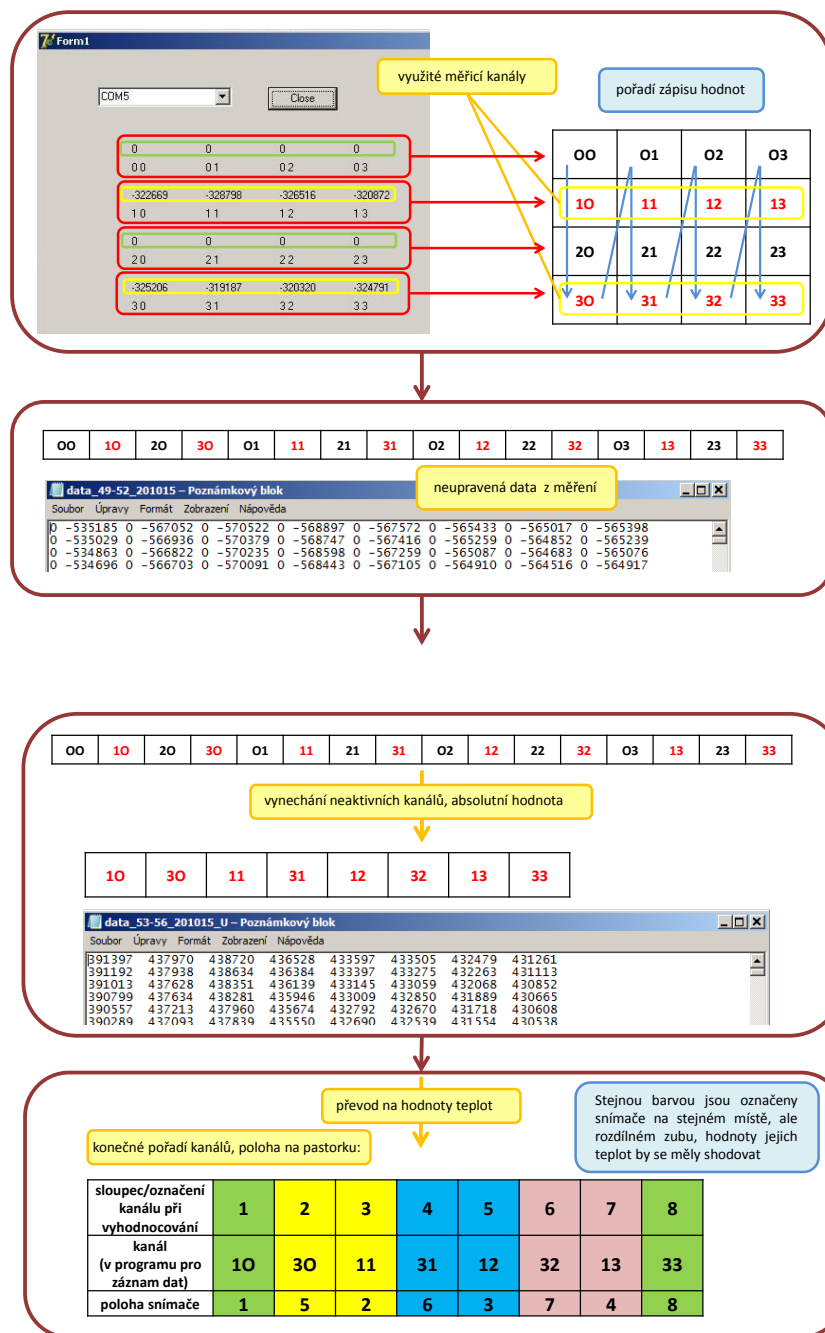
kanálů na konci vyhodnocování, aby nedošlo ke špatnému výkladu výsledků. Musely být jednoznačně určeny kanály termistorů a přiřazeny jim jejich správné umístění na pastorku stálého převodu.

K prvním změnám v pořadí dat dochází již při ukládání. Na čelním panelu programu pro ukládání dat je vždy zobrazen název kanálu a jeho aktuální načítaná hodnota. Hodnoty a popisky kanálů tvoří jakousi matici o rozměru 4x4, do datového souboru hodnot kanálů je ale zapisováno 16 sloupců vedle sebe. Zapisování hodnot se neděje v posloupnosti po řádcích, ale po sloupcích. První čtyři sloupce v datovém souboru záznamu odpovídají hodnotám v prvním sloupci (v pořadí odshora) matice na panelu programu pro záznam dat, analogicky se tak děje i s dalšími sloupci.

Dále dochází k práci s datovým souborem, ve kterém je známo pořadí kanálů, a tedy přiřazení sloupců ke snímačům. Vzhledem k tomu, že zapojeno je pouze osm kanálů, některé sloupce vykazují pouze nulové hodnoty. Sloupce s nulovými hodnotami lze vymazat a nezahrnout je do dalšího vyhodnocování. Po této úpravě zbývá jen osm sloupců s daty o teplotách osmi připojených snímačů. Tato data je možné převést na hodnoty teplot již popsáným způsobem.

Vzhledem k zachování přehlednosti byly již upravené sloupce s hodnotami teplot očíslovány 1-8, jejich skutečnou polohu na pastorku vystihuje dvojčíferné číslo kanálu, které již bylo uvedeno v kapitole 4.5.1 na obrázku 4.38.

Celý postup značení sloupců (kanálů záznamu teplot) je zachycen na diagramu v obrázku 4.64, je zde přehledně znázorněn vývoj a změny při určování pořadí a číslování sloupců hodnot, závěr diagramu obsahuje tabulku přiřazených čísel kanálů/sloupců a označení jejich pozici na pastorku.



Obrázek 4.64: Značení sloupců dat- hodnot kanálů

Popsaným způsobem byla vyhodnocena všechna provedená měření. Vzhledem k výsledkům je nutné provést diskusi (viz další kapitoly) nad jevy, které se na grafech teplot projeví.

4.6.3 Popis zařízení - dynamometry

Dříve popsané části pro provoz převodovky (rám, spalovací motor, převodovka pro měření, spojovací hřídele a nezbytné příslušenství) jsou jen částí celého zařízení. Práce celé soustavy by nebyla možná bez dynamometrů a jejich ovládání. Dynamometry v laboratořích KVM jsou součástí zařízení zvaného „Powertrain Test Bed System“. Zařízení je koncipováno především ke zkouškám celých hnacích ústrojí poháněných a uložených tak jako v reálném vozidle. Lze využít pro brzdění výstupních hřídelů až čtyř dynamometrů. V našem případě využíváme pouze jednoho dynamometru. Dynamometry ve zkušebně je možné ovládat v rozličných režimech a nastaveních, pro náš případ nejlépe vyhovuje nastavení, kdy jsou souběžně provozovány dva protilehlé dynamometry, oba se otáčejí, avšak jen jeden vyvozuje zatěžující moment (zařízení má jen jeden výstupní hřídel).

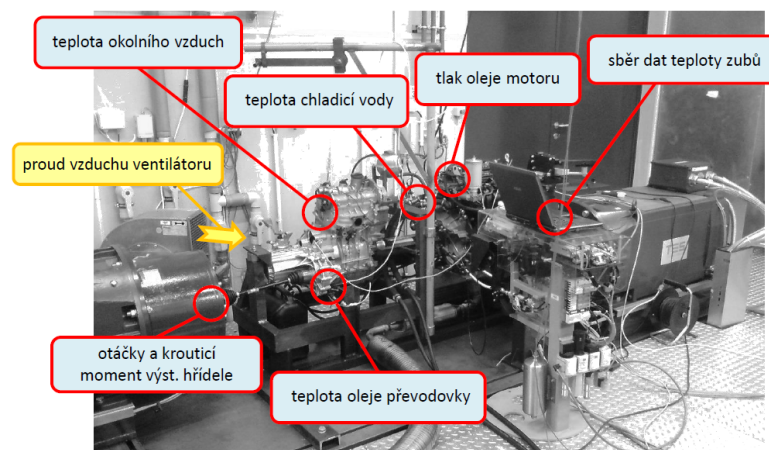
Dynamometry jsou součástí zkušebny, která obsahuje další podstatné součásti pro provoz a zajištění bezpečnosti. Ve zkušebně je dále obsaženo zařízení pro ovládání spojkového pedálu a volbu rychlostního stupně. V našem případě nebyla možnost volby rychlostního stupně využita, neboť docházelo k řazení stupňů manuálně.

Bylo nutné využít ovládání spojkového pedálu, kdy toto zařízení je napojeno na ovládací systém a v případě jakékoliv neshody s kritickými hodnotami sledovaných veličin dochází k rozpojení spojky a okamžitému zastavení dynamometrů, jediné tak se dá předejít vážným haváriím a zničení zařízení. Našimi hlavními sledovanými veličinami jsou: tlak oleje a otáčky spalovacího motoru, otáčky výstupní hřídele (otáčky dynamometru), teplota chladicí kapaliny. Systém dále reaguje na mnoho veličin, mezi nimiž jsou např. nízké napětí baterie, chybný průtok chladicí kapaliny atd..

Podstatné je měření otáček motoru a otáček výstupních za měřenou převodovkou (otáček dynamometru). Vždy je dopočítávána ideální hodnota ze zadaných převodových čísel převodovky a je kontrolována odchylka od skutečných hodnot, v případě překročení mezní hodnoty (velikost skluzu) je automaticky spojka rozpojena a dynamometry zastaveny, nemůže tedy dojít k poškození. K zastavení zařízení může, dle nastavení, docházet při překročení téměř kterékoliv zmiňované veličiny.

4.6.4 Měřené veličiny

Soustava dynamometrů je opatřena doplňujícími systémy, které umožňují měření a záznam hodnot některých veličin. Systémy jsou schopné převádět signály od určitých typů snímačů a zaznamenávat hodnoty automaticky do interní paměti řídicího počítače. Měření a záznam může být realizován s frekvencí 10-100 Hz. Zaznamenávány byly hodnoty teploty okolí a teploty oleje v převodovce. Dále jsou automaticky zaznamenávány tlak oleje a teplota chladicí kapaliny ve spalovacím motoru, otáčky a zatížení dynamometrů, „zařazený rychlostní stupeň“. Místa měření teplot a dalších veličin jsou zachycena na obrázku 4.65.



Obrázek 4.65: Místa měření veličin

4.6.5 Podmínky měření

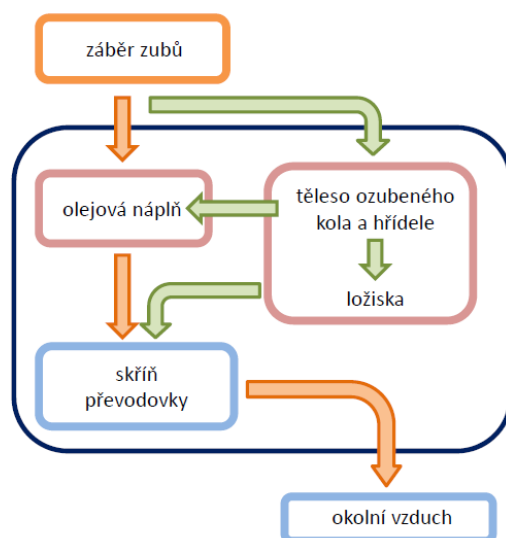
Vhodná definice podmínek měření je nezbytná, po přihlédnutí k limitům zařízení byly definovány následující předpoklady.

Byl zaveden předpoklad že teplota okolního vzduchu je konstantní, a to 20°C. Místnost s dynamometry je klimatizována a je tedy možné teplotu vzduchu regulovat. Regulace teploty v místnosti je založena na principu přívodu chladnějšího vzduchu o přesně definované teplotě, v tomto případě 15°C, a regulaci množství vzduchu odváděného z místnosti.

Části převodovky (včetně oleje) obklopující pastorek stálého převodu, jsou považovány za "vrstvu se specifickými vlastnostmi" oddělující tuto součást od okolního prostředí. Předpokladem je i to, že fyzikální stav této "vrstvy" může ovlivňovat teploty zubů pastorku.

Z povrchu skříně převodovky je teplo odváděno nucenou konvekcí do okolního vzduchu. Zdrojem proudění vzduchu v okolí skříně převodovky je radiální ventilátor. Proud vzduchu je konstantní.

Předpokládaný tok tepla vyvozeného v převodovce záběrem zubů je zachycen na diagramu obrázek 4.66. V diagramu je "záběrem zubů" myšleno všeobecné označení tohoto procesu probíhajícího při funkci převodovky souběžně na několika místech. Diagram má naznačit předpokládaný tok tepla, kdy dochází ke vzájemnému ovlivnění jednotlivých součástí převodovky.



Obrázek 4.66: Předpokládaný tok tepla vzniklého záběrem zubů

4.6.6 Zadání parametrů a mezních hodnot měřeného řetězce

Zadávání mezních hodnot sledovaných veličin a parametrů probíhá vložení definčního souboru. Soubor lze modifikovat v programu MATLAB.

Systém stále dohlíží na dodržování nastavených limitních hodnot tak, aby nemohlo dojít k nechtěnému poškození jak částí zařízení, tak i zatěžovaných ústrojí.

Je nutné zadat mezní hodnoty: dovoleného skluzu spojky, točivého momentu, tlaku oleje ve spalovacím motoru, teploty chladicí kapaliny atd..

Jedním z nejdůležitějších zadávaných parametrů jsou převodová čísla instalované převodovky. Byla zadána převodová čísla převodovky MQ100 (NZC).

Kontrola skluzu spojky je prováděna porovnáním teoretických, s využitím převodových čísel dopočetných, otáček výstupní hřídele s otáčkami naměřenými. V případě skluzu vyššího než je maximální povolená hodnota (zadaná uživatelem) je okamžitě řetězec rozpojen třecí spojkou a dochází k zastavení dynamometrů.

Otáčky spalovacího motoru nezbytné pro výpočet jsou měřeny inkrementálním snímačem spojeným s klikovou hřídelí (zmíněno v 4.3.2, zachyceno na obrázku 4.11 - strana 31).

4.6.7 Spouštění zařízení

Před každým měřením je nutné zařízení po částech zapnout a to v přesně určeném pořadí, v opačném případě by systém hlásil chyby a došlo by ke spuštění alarmu. První je nutné zapnout přívody chladicí kapaliny dynamometrů, dále přívod napětí na svorky elektroinstalace spalovacího motoru kontrolované systémem, tyto svorky nejsou totožné s napájením spalovacího motoru pro pohon mého stavu. Následuje spuštění přívodu tlakového vzduchu pro pohon automatu pro řazení rychlostních stupňů a ovládání spojky, automat je využit pouze pro funkci ovládání spojky. Dále je možné zapnout hlavní spínač systému a zapnout počítač pro ovládání systému.

Spuštění systému odsávání výfukových plynů spojené s klimatizací místnosti je možné aktivovat.

Před samotným startem spalovacího motoru je nutné spustit program pro ovládání zařízení na počítači určeném pro řízení systému. Ovládání pomocí tohoto programu bude popsáno dále, avšak předběhněme a řekneme, že je nutné rozpojit třetí spojku na stavu, aby bylo možné nastartovat spalovací motor, k onomu rozepnutí dochází právě pomocí akčního členu ovládaného z panelu řídicího programu. Ovládání pomocí tohoto panelu bude popsáno dále.

Po rozepnutí spojky je možné přistoupit k samostatnému startu spalovacího motoru pohánějícího stav. Následuje sepnutí odpojovače baterie a tím přivedení napětí do elektrického systému stavu. Baterie stavu je během měření stále připojena na nabíječku, neboť funkce alternátoru spalovacího motoru nebyla aktivována. Po přivedení napětí do elektrického systému stavu je možné spustit čerpadlo benzínu, případně ventilátor chlazení, v mém případě došlo k přepojení okruhu chlazení motoru s externím výměníkem. Po spuštění palivového čerpadla je přivedeno napětí do cívky startéru a je spuštěn spalovací motor.

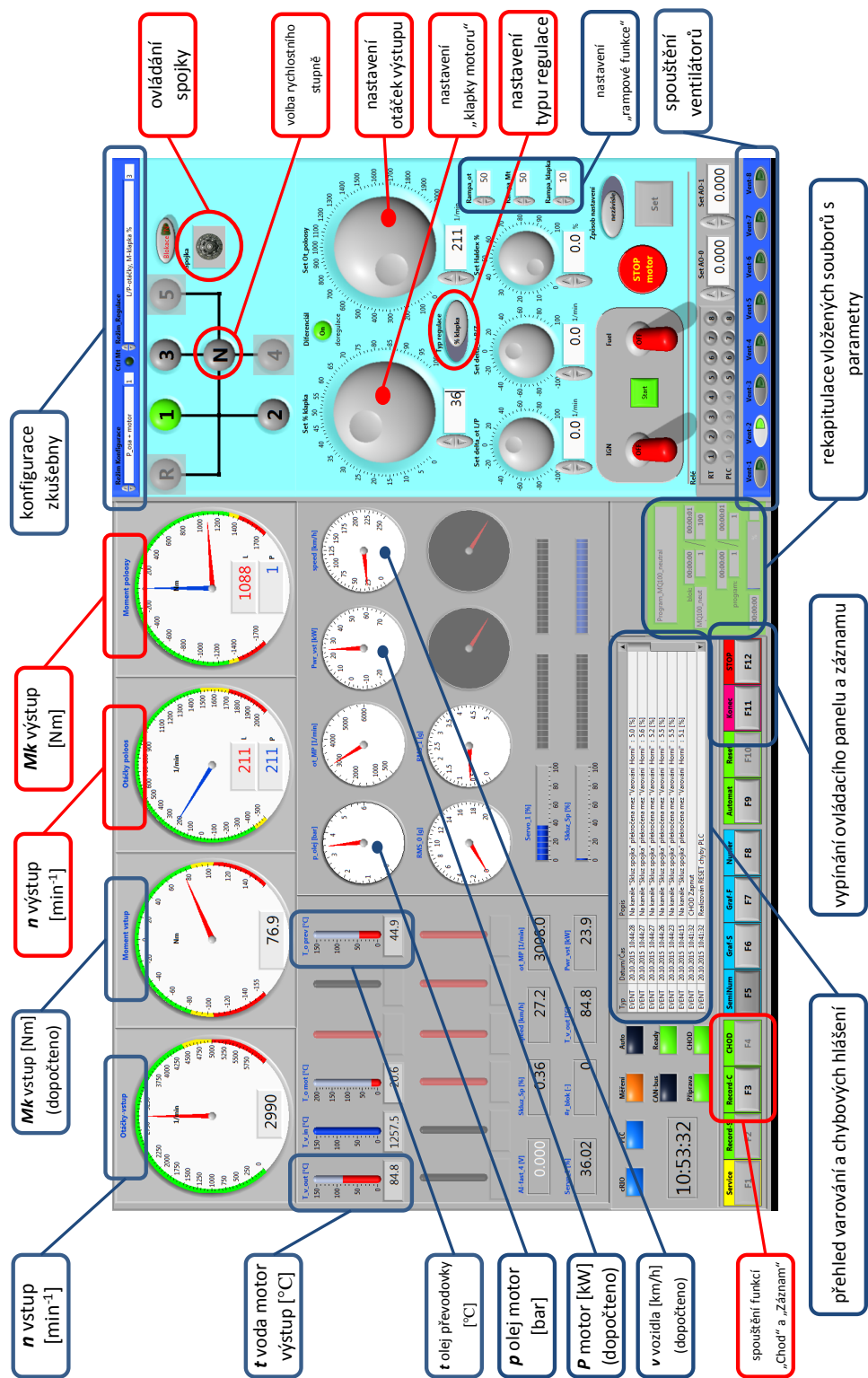
Po spuštění motoru nedochází, vzhledem k rozpojené spojce, k protáčení hnací hřídele za motorem, v případě zařazeného neutrálu na převodovce je možné spojku spojit a dojde k protáčení vstupní hřídele měřené převodovky. Ve fázi, kdy je motor v chodu a spojka rozpojena, je možné manuálně zařadit rychlostní stupeň na převodovce usazené na stavu.

Ve fázi startu a chodu motoru se dostává ke slovu ovládání pomocí řídicího programu systému dynamometrů.

4.6.8 Ovládací panel

Základním ovládacím prvkem systému je počítač s programem pro řízení. Rozhraním mezi obsluhou stanoviště a systémem dynamometrů je ovládací panel řídicího programu. Na ovládacím panelu jsou zobrazovány hodnoty veličin a je možno jim přizpůsobovat nastavení akčních členů. Takovou hodnotou je například teplota chladicí kapaliny spalovacího motoru, kdy po nastavení požadované hodnoty dochází k její automatické regulaci.

Ovládací panel obsahuje množství zobrazovačů pro hlavní měřené veličiny a je na něm možné přímo řídit akční členy spojené se spalovacím motorem, dynamometrem a také doplňujícími systémy jako je okruh chlazení spalovacího motoru. Popis ovládacího panelu je zachycen na obrázku 4.67.



Obrázek 4.67: Ovládací panel - popis funkcí

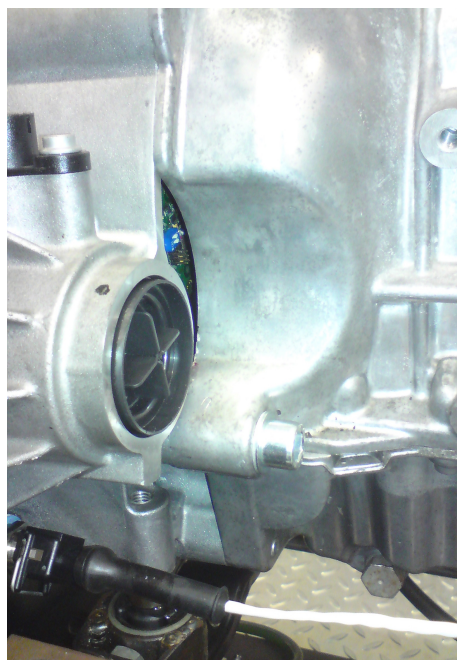
Po spuštění ovládacího programu je nutné vybrat zmíněné konfigurační soubory pro nastavení (převodová čísla a mezí hodnoty kontrolovaných veličin) a pro automatické řízení zkoušky. Následně je na monitoru zobrazen hlavní ovládací panel, kde je nutné spustit režim „Příprava“. Pokud je již motor v chodu lze přepnout, při zařazeném neutrálu, do režimu „Chod“. Automaticky je spojka stále rozepnuta, avšak pozor: při změnách režimů se může spojit, je nutné mít vždy zařazen neutrální! Po přepnutí do režimu „Chod“ a rozepnutí spojky, je možné manuálně zařadit rychlostní stupeň.

Ve fázi, kdy je spalovací motor v chodu, program ve stavu „Chod“, spojka rozpojena a je fyzicky zařazen rychlostní stupeň na převodovce se dostává ke slovu ovládání spojky a parametrů chodu (otáčky, zatížení). Ještě před uvedením řetězce do pohybu je nutné na ovládacím panelu zadat rychlostní stupeň který je na převodovce zařazen. Následně spojka zůstává rozpojena, avšak dynamometr se roztočí otáčkami dopočtenými z převodových čísel a otáček naměřených na spalovacím motoru. Dále lze spojit spojku, ke skluzům a zatížení motoru nemůže docházet, neboť se dynamometr protáčí synchronními otáčkami a není nastaven žádný brzdny moment, který by měl vyvozovat.

Po spojení řetězce pomocí spojky byl zvolen systém regulace zatížení v režimu „Otáčky“. Tento režim umožňuje udržovat stále otáčky dynamometrů a velikost točivého momentu je regulována „Polohou klapky“ spalovacího motoru. Lze tedy nastavit požadované otáčky dynamometr (výstupního hřídele) a následně nastavit „Polohu klapky“ tak, aby odpovídal požadovaný točivý moment měřený na výstupní hřídeli (dynamometru).

V měřených režimech je nastavena požadovaná hodnota otáček výstupního hřídele a základní nastavení škrticí klapky, dále dochází ke změnám polohy klapky a zvyšování točivého momentu (zatížení) dle požadovaných režimů zatížení (viz kapitola 4.6.1 - Zátěžné režimy).

Během měření je nutné zaznamenávat hodnoty teplot na určených místech ozubených kol. K tomuto účelu slouží další počítač (zachycen na obrázku 4.65 - Místa měření teplot) vybavený již popsáním softwarem pro sběr dat. Počítač je propojen kabelem se státorem zařízení pro měření teplot. Stator není třeba napájet akumulátory, neboť k tomuto dochází v rámci propojení s PC pomocí USB kabelu. Rotor zařízení pro měření teplot obsahuje vlastní baterii, a přestože je její kapacita dimenzována na velice dlouhou dobu funkce zařízení, je nutné ji odpojovat. K tomuto účelu je rotor zařízení vybaven vypínačem. Vzhledem k tomu, že se rotor nachází ve špatně přístupném místě, bylo vyřešeno vypínání pomocí ocelového háčku vsunutého k vypínačům na rotoru otvorem vzniklým vynecháním ochranného plechového krytu mezi „motorem“ a převodovkou. Ocelovým háčkem lze poměrně snadno vypnout napájení rotoru. Prostor pro vypínání a vypínač je zachycen na obrázku 4.68.



Obrázek 4.68: Prostor pro vypínání rotoru

5 Diskuze poznatků a výsledků

Vzhledem k experimentální povaze práce, zvoleným měřeným veličinám a systému jejich měření byl rozsah získaných poznatků poměrně veliký a nebylo jednoduché výsledky sumarizovat. S naměřenými hodnotami se otvírá prostor pro diskuzi nad jejich významem a správnou interpretací. Teplota, jejíž hodnoty byly sledovány, je fyzikální stav látky, který je velice pomíjivý. Teplo, které při provozu vzniká a ovlivňuje tak vnitřní energii těles a tím i jejich teplotu, je sdíleno s okolím.

Ačkoliv byly popsány a zaznamenávány podmínky měření, bylo nutné provést zjednodušení a považovat některé veličiny za přibližně konstantní (okolní teplota, atmosférický tlak, vzdušná vlhkost).

Z naměřených hodnot byl vytvořen soubor grafů a diagramů (viz odstavce níže), které mohou sloužit k tomu, abychom si mohli vytvořit představu o teplotních podmínkách zubů pastorku stálého převodu při provozu převodovky.

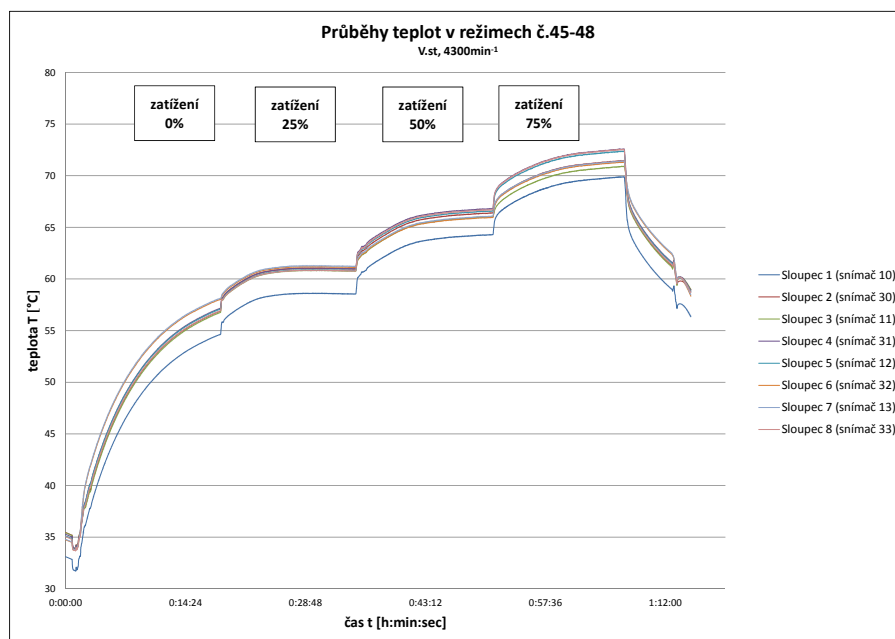
5.1 Závislost "teplota-čas" pro jednotlivé rychlostní stupně

Grafy zachycující průběh teploty v závislosti na čase, které vznikly v rámci vyhodnocování měření, jsou základním vyobrazením hlavních sledovaných veličin. Grafy byly sestaveny podle tabulky zvolených zatížení a otáček - příloha **A.1** - pro každý rychlostní stupeň vznikly vždy tři grafy (různé vstupní otáčky) o čtyřech hladinách zatížení (čtyři hodnoty zatížení). Režimy zatížení jsou popsány v kapitole **4.6.1**. Celkem bylo tedy sestaveno **15 grafů**.

Tyto grafy zachycují průběh hodnot teplot všech osmi využitých kanálů pro měření, avšak při dalším vyhodnocování jsem vynechal kanál označený 10 (sloupec 1), byl poškozen při montáži. Snímače byly umístěny duplicitně, a proto místo snímače 10 je možné brát v úvahu signál ze snímače 33, který je umístěn ve stejné geometrické poloze.

Sada měření při konstantních otáčkách a čtyřech hladinách zatížení je zapracována do grafu (viz např. obrázek **5.1**). Zatížení v jednotlivých hladinách bylo ponecháno pro ustálení po dobu **15 minut**, hodnoty teplot v jednotlivých místech byly zaznamenány s frekvencí 1Hz do paměti a poté zpracovány graficky. Změny zatížení jsou v grafech dobře patrné a projeví se zvýšením teploty. Vzhledem k tomu, že regulace parametrů výkonu (točivého momentu, otáček) nebyla dokonalá je patrné na některých grafech kolísání hodnot teploty způsobené právě změnami zatížení.

Grafy jsou označeny čísly měření, která byla přiřazena podle tabulky zatížení (viz příloha A.1), např. 49-52. Jako příklad uveďme graf "45-48" na obrázku 5.1, který zachycuje časovou závislost teplot při provozu převodovky na pátý rychlostní stupeň, vstupní otáčky převodovky jsou 4300 min^{-1} a čtyři hladiny zatížení (0%, 25%, 50%, 75%).

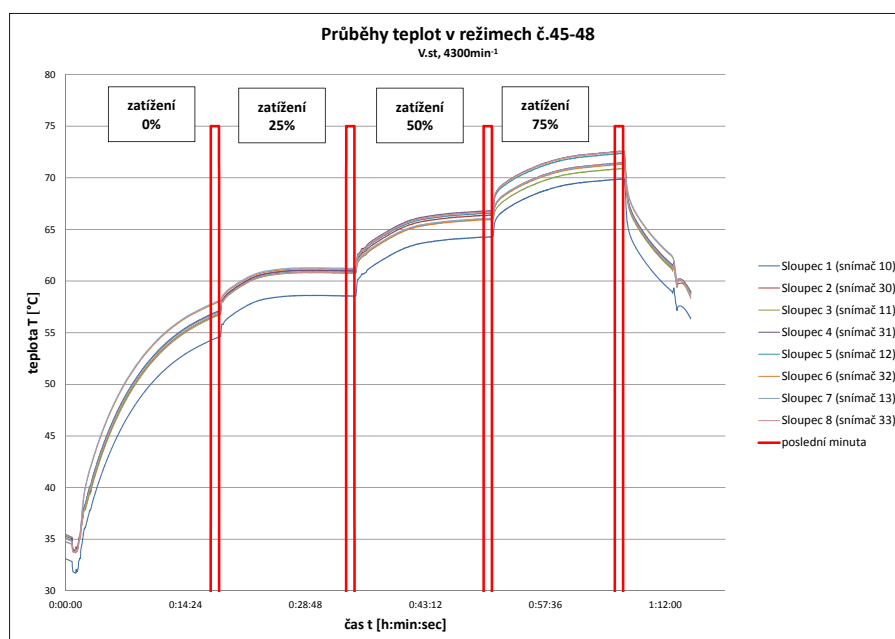


Obrázek 5.1: Průběh teplot měřených při provozu v režimech 45-48

Vzhledem k rozsahu dokumentace jsou všechny grafy uvedeny v příloze pod označením příloha A.2. Na grafech je také vyznačena oblast poslední minuty 15ti minutových intervalů konstantního zatížení, důvod bude vysvětlen dále.

Během měření bylo zjištěno, že pro dosažení rovnovážného tepelného stavu je třeba minimálně **15minut** provozu ve zvoleném režimu, proto byly body měření realizovány v časových intervalech o uvedené délce.

Významnou se jeví **maximální dosažená teplota** na konci těchto časových úseků. Jako vhodné měřítko se ukázalo vytvoření průměrné hodnoty údajů o teplotě naměřené každým ze snímačů a to za **poslední minutu 15ti minutového intervalu**. Protože vzorkovací frekvence byla **1Hz**, byla střední hodnota vypočtena z posledních 60 hodnot před přechodem k dalšímu režimu zatížení. Průměrované části (vždy poslední minuta režimu) jsou vyznačeny na obdobném grafu "45-48" v obrázku 5.2. Všechny průměrované úseky jsou zakresleny v grafech v příloze A.2.



Obrázek 5.2: Průběh teplot naměřených při provozu v režimech 45-48 s vyznačenými intervaly pro průměrování (poslední minuty cyklu)

Hodnoty teplot měřené každým teplotním snímačem za poslední minutu jednoho intervalu zatěžování byly zapsány do tabulek. Pro jednoduchost byly hladiny otáček 3000 min^{-1} , 3650 min^{-1} , 4300 min^{-1} označeny písmeny A, B, C. Jako příklad poslouží tabulka V.C-45-48, viz tabulka 5.1, tedy pátý rychlostní stupeň, 4300 min^{-1} , měření číslo 45-48. Tabulky obsahují v posledním řádku aritmetický průměr z průměrných teplot poslední minuty režimu ze všech kanálů. Hodnotu tohoto "průměru z průměrů" označují "průměrem celkovým". Veškeré tabulky středních hodnot teploty jsou v příloze A.3.

V.C-45-48 (V.st, 4300 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	54,42	58,55	64,26	69,86
30/2	56,67	60,97	66,37	71,42
11/3	56,54	60,77	65,99	70,86
31/4	56,94	61,00	66,78	72,54
12/5	56,86	60,83	66,55	72,33
32/6	57,82	61,13	65,93	71,28
13/7	57,92	61,23	66,05	71,38
33/8	56,70	60,79	66,68	72,51
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	57,06	60,96	66,34	71,76

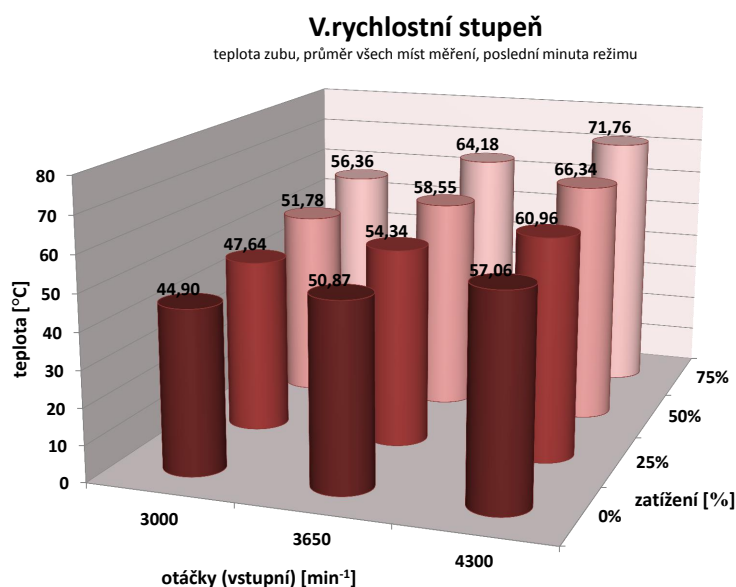
Tabulka 5.1: Tabulka průměrných hodnot teploty pro měření "45-48"

Rychlost akumulace (ohřevu) je závislá na parametrech. Podstatný vliv má tepelná energie jako zdroj, ale také tepelný tok (přestup mimo těleso). V obrázku 5.1 jsou oteplovací křivky pro různé zatěžovací režimy. Z nich je zřejmé, že na konci sledovaného zatěžovacího režimu je gradient nevýrazný a tedy rychlost akumulace téměř nulová ($\frac{dT}{dt} \cong 0$), zatímco při přechodu na vyšší hladinu zatížení se gradient mění ($\frac{dT}{dt} > 0$). Zvýšením zatížení narůstá výkon a i disipovaný výkon, tedy zdroj tepla.

5.2 Závislost "teplota-otáčky-zatížení"

Grafy uvedené v předchozí podkapitole 5.1 zobrazují závislost teploty na čase, tedy jen dvě hodnoty (teplota-čas) a třetí (zatížení) je parametrem.

Závislost teploty na rychlosti a zatížení ukazují trojrozměrné diagramy, ve kterých dvě osy (x,y) představují otáčky a zatížení, třetí (z) zachycuje hodnotu teploty zubu (tzv. celkového průměru viz kapitola 5.1). Tyto diagramy byly zpracovány pro všechny rychlostní stupně. Jako příklad uveďme na obrázku 5.3 diagram pro pátý rychlostní stupeň. Diagramy průměrných teplot pro všechny rychlostní stupně jsou obsaženy v příloze A.4.

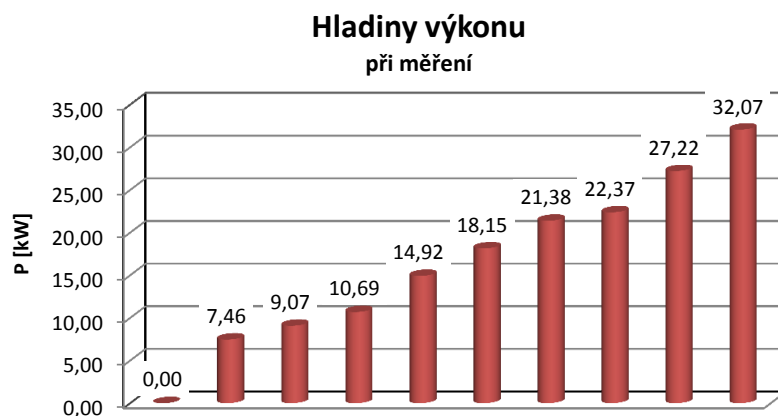


Obrázek 5.3: Diagram závislosti "teplota-otáčky-zatížení" pro pátý rychlostní stupeň

5.3 Porovnání teplot při provozu v rozdílných hladinách výkonu

Parametrem určujícím provozní stav převodovky je bezesporu hladina výkonu ve kterém je provozována. Výkon je dopočtená veličina určená točivým momentem [M_k] a otáčkami [n]. Výkon může být konstantní, avšak velikost obou činitelů může být rozdílná. V tomto případě lze sledovat teploty ozubení na několika výkonových hladinách lišících se vzájemně velikostí M_k a n . Parametry M_k a n jsou závislé na zařazeném rychlostním stupni.

Sloupcový diagram na obrázku 5.4 zachycuje rozložení devíti nenulových výkonů, které lze užít při provozu a analyzovat teplotní stav ozubení pastorku.



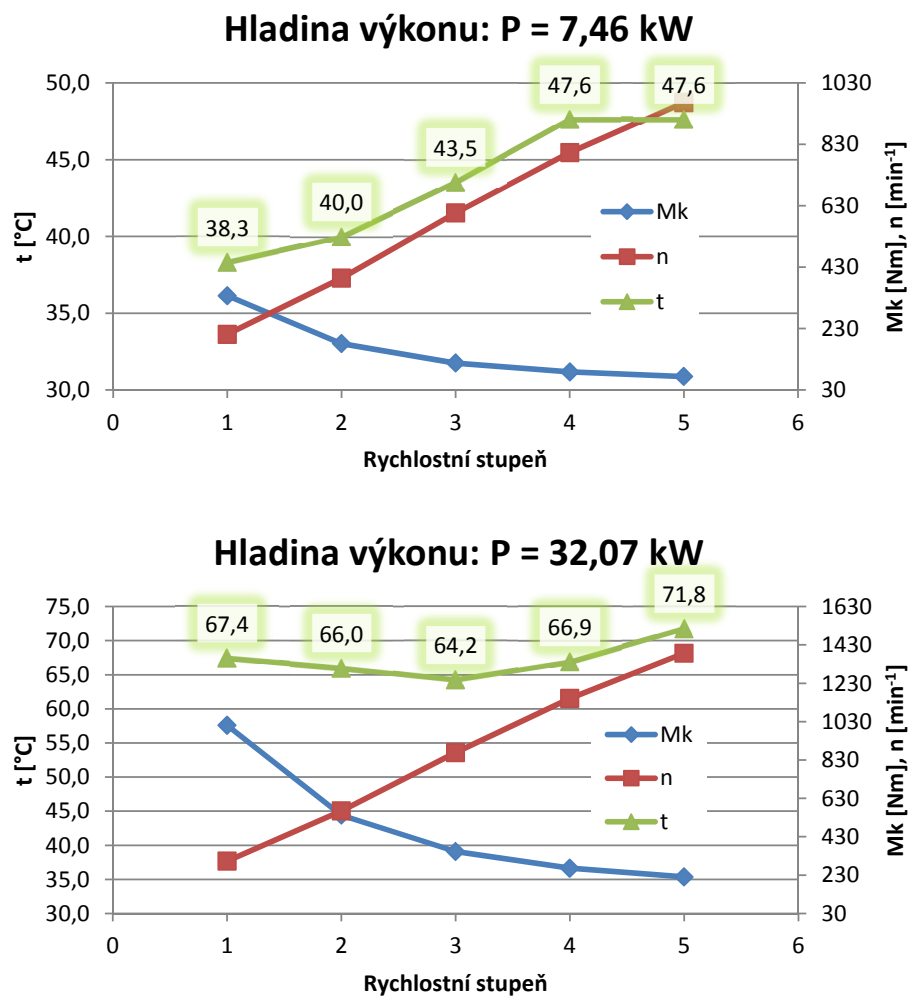
Obrázek 5.4: Výkony využité pro porovnání teplot ozubení pastorku

Výkony se liší parametry M_k a n podle zařazeného rychlostního stupně; jsou uvedeny v příloze A.1. V tabulce 5.2 jsou uvedeny hodnoty točivého momentu a otáček na výstupu převodovky. Pro následné porovnávání teplot ozubení nebyla využita hladina výkonu s nulovým zatížením ($P=0$), v tabulce 5.2 jsou zaneseny jen hladiny výkonu užité pro srovnávání teplot ozubení pastorku.

P [kW]	I.st		II.st		III.st		IV.st		V.st	
	Mk výstup [Nm]	n výstup [min ⁻¹]	Mk výstup [Nm]	n výstup [min ⁻¹]	Mk výstup [Nm]	n výstup [min ⁻¹]	Mk výstup [Nm]	n výstup [min ⁻¹]	Mk výstup [Nm]	n výstup [min ⁻¹]
7,46	337,0	211,4	180,8	394,1	117,5	606,4	88,7	803,0	73,7	967,3
9,07	337,0	257,3	180,8	479,5	117,5	737,8	88,7	977,0	73,7	1176,9
10,69	337,0	303,1	180,8	564,9	117,5	869,1	88,7	1151,0	73,7	1386,5
14,92	673,9	211,4	361,6	394,1	235,0	606,4	177,4	803,0	147,3	967,3
18,15	673,9	257,3	361,6	479,5	235,0	737,8	177,4	977,0	147,3	1176,9
21,38	673,9	303,1	361,6	564,9	235,0	869,1	177,4	1151,0	147,3	1386,5
22,37	1010,9	211,4	542,4	394,1	352,5	606,4	266,2	803,0	221,0	967,3
27,22	1010,9	257,3	542,4	479,5	352,5	737,8	266,2	977,0	221,0	1176,9
32,07	1010,9	303,1	542,4	564,9	352,5	869,1	266,2	1151,0	221,0	1386,5

Tabulka 5.2: Výkony využitě pro porovnání teplot ozubení pastorku - parametry M_k a n na výstupu z převodovky

V základních grafech závislostí teplot na čase byly vyhledány intervaly při kterých byla převodovka provozována na zvolené hladině výkonu. Byla určena průměrná teplota za poslední minutu časového intervalu u všech snímačů, následně byl určen aritmetický průměr z těchto hodnot. Pro každou hladinu výkonu bylo porovnáno pět teplot (převodovka byla provozována při stejném výkonu na všech pět rychlostních stupňů). Diagramy v obrázku 5.5 ukazují teploty při dvou hladinách výkonu, nejnižší nenulové a nejvyšší. Diagramy pro všechny zvolené hladiny výkonu jsou obsaženy v příloze A.5.



Obrázek 5.5: Diagramy nejvyšších teplot ozubení naměřených při provozu v hladinách minimálního a maximálního zvoleného výkonu

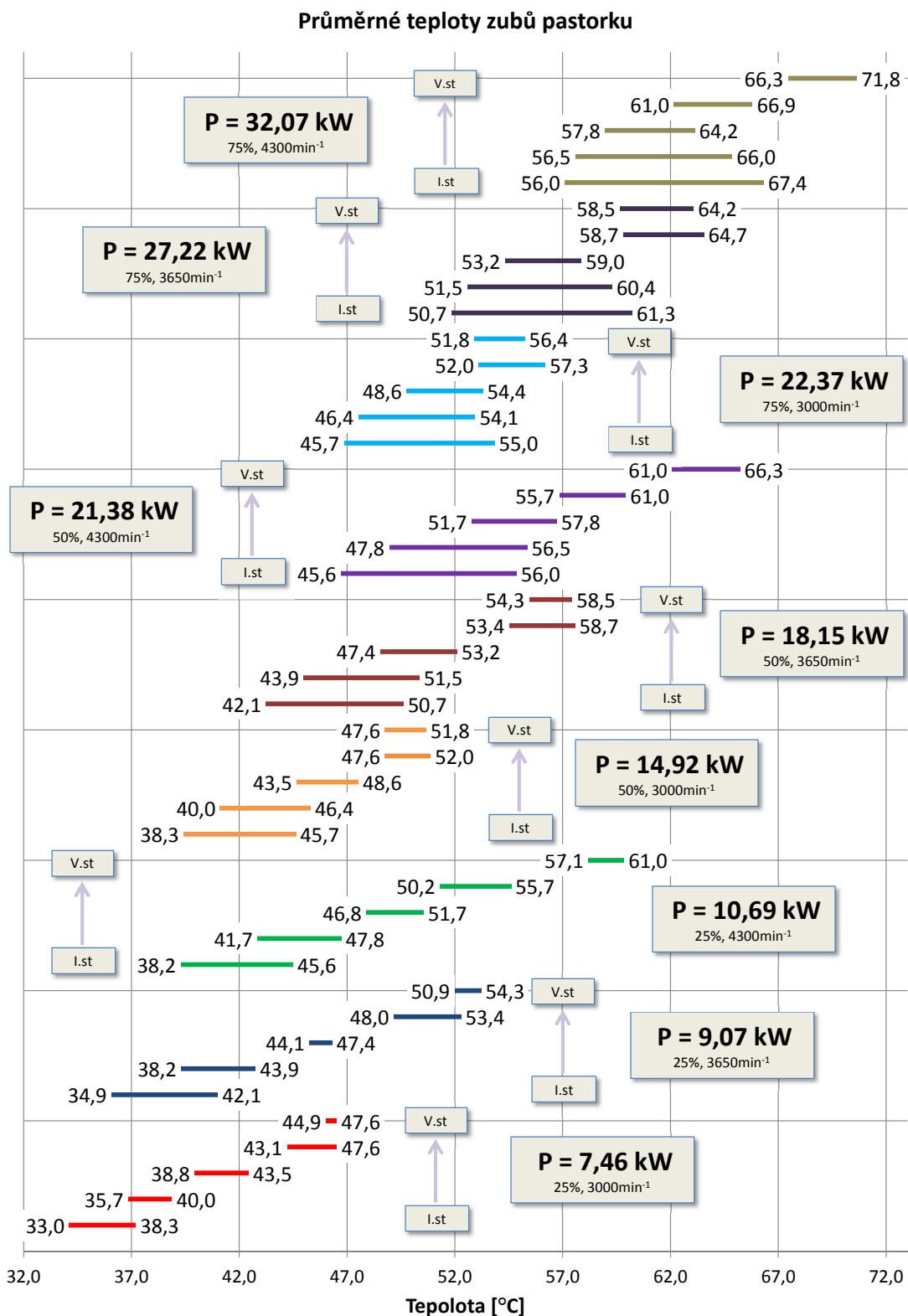
Tabulka 5.3 obsahuje souhrn teplot na začátku měřeného intervalu (T_{start}), teplotu na konci intervalu (T_{fin}), hladinu výkonu a číslo měřeného intervalu. Počáteční hodnota teploty měřeného intervalu je v tomto případě rovna konečné teplotě intervalu předchozího.

P [kW]	I.st			II.st			III.st			IV.st			V.st		
	č.	T _{start}	T _{fin}	č.	T _{start}	T _{fin}	č.	T _{start}	T _{fin}	č.	T _{start}	T _{fin}	č.	T _{start}	T _{fin}
7,46	50	33,0	38,3	26	35,7	40,0	14	38,8	43,5	2	43,1	47,6	38	44,9	47,6
9,07	54	34,9	42,1	30	38,2	43,9	18	44,1	47,4	6	48,0	53,4	42	50,9	54,3
10,69	58	38,2	45,6	34	41,7	47,8	22	46,8	51,7	10	50,2	55,7	46	57,1	61,0
14,92	51	38,3	45,7	27	40,0	46,4	15	43,5	48,6	3	47,6	52,0	39	47,6	51,8
18,15	55	42,1	50,7	31	43,9	51,5	19	47,4	53,2	7	53,4	58,7	43	54,3	58,5
21,38	59	45,6	56,0	35	47,8	56,5	23	51,7	57,8	11	55,7	61,0	47	61,0	66,3
22,37	52	45,7	55,0	28	46,4	54,1	16	48,6	54,4	4	52,0	57,3	40	51,8	56,4
27,22	56	50,7	61,3	32	51,5	60,4	20	53,2	59,0	8	58,7	64,7	44	58,5	64,2
32,07	60	56,0	67,4	36	56,5	66,0	24	57,8	64,2	12	61,0	66,9	48	66,3	71,8

Tabulka 5.3: Souhrn teplot ozubení pastorku na začátku (T_{start}) a konci (T_{fin}) intervalu měření

Počáteční a konečné teploty ozubení byly zaznamenány do diagramu v obrázku 5.6¹.

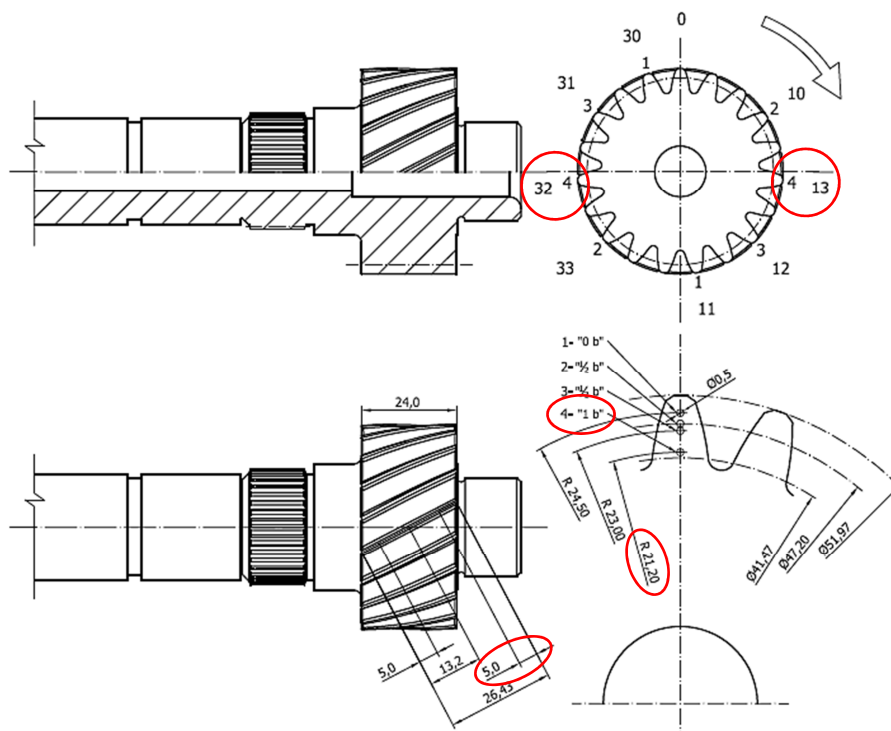
¹Ten obsahuje jednak informaci o teplotách, ale i o parametrech, při kterých byly naměřeny. Tedy 9 hladin výkonu a 5 rychlostních stupňů.



Obrázek 5.6: Teploty ozubení pastorku na začátku a konci intervalu měření, provozní parametry při měření - souhrnný diagram

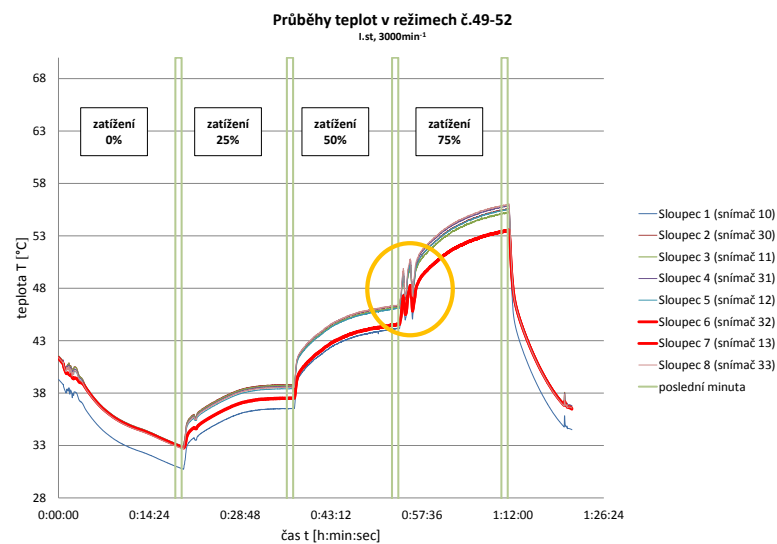
5.4 Teplota ve sledovaných místech zubů

Systém měření teplot byl navržen s cílem sledovat a zaznamenat teploty v jednotlivých místech zubů. Umístění snímačů bylo popsáno v kapitole 4.5.1. Rozdílnost teplot v jednotlivých místech zubů lze pozorovat na příkladu snímačů číslo **13** a **32**. Umístění snímačů je zvýrazněno na obrázku 5.7.

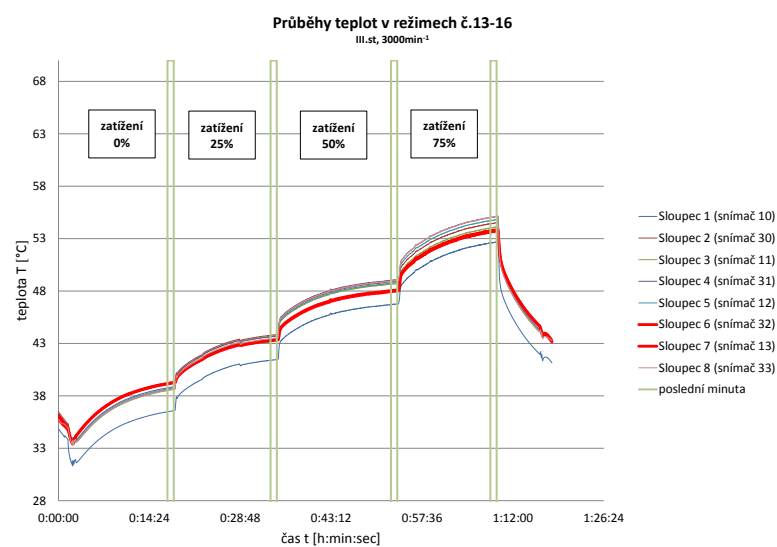


Obrázek 5.7: Umístění snímačů 13 a 32

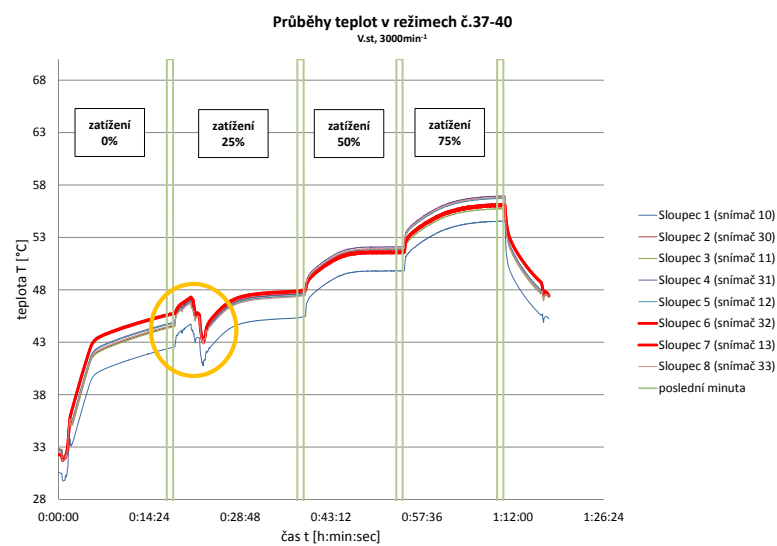
Na obrázku 5.8 jsou zachyceny diagramy průběhů teplot v režimech provozu na I., III. a V. rychlostní stupeň, při vstupních otáčkách 3000 min^{-1} a pro všech na čtyři zvolená zatížení výstupní hřídele (0%, 25%, 50%, 75%). Průběhy teplot naměřených snímači **13** a **32** jsou zvýrazněny červenými čarami.



(a)



(b)



(c)

Obrázek 5.8: Teplot měřené snímači 13 a 32

Oba snímače jsou umístěny ve stejném geometrickém místě zubu, avšak každý v jiném zubu. Křivky, jimiž jsou vykresleny průběhy teplot naměřených snímači 13 a 32, se prakticky překrývají, což potvrzuje předpoklad, že vzhledem k umístění snímačů by měly být i hodnoty teplot naměřené oběma snímači stejné, tento předpoklad slouží pro ověření správnosti měření.

Jak je patrné z diagramu teplot na obrázku 5.8a jsou hodnoty měřené sledovanými snímači podstatně nižší než teploty naměřené ostatními snímači. Toto odchýlení je v odstupu větším než je předpokládaná chyba měření, největší chyba by měla být podle porovnání křivek při kalibraci maximálně $0,25^{\circ}\text{C}$ - viz kapitola 4.4.5).

Obrázek 5.8c dále podtrhuje předchozí trend posunu křivky teplot měřených sledovanými snímači, kdy už i při zatížení 25% je tato teplota vyšší než teplota měřená ostatními snímači.

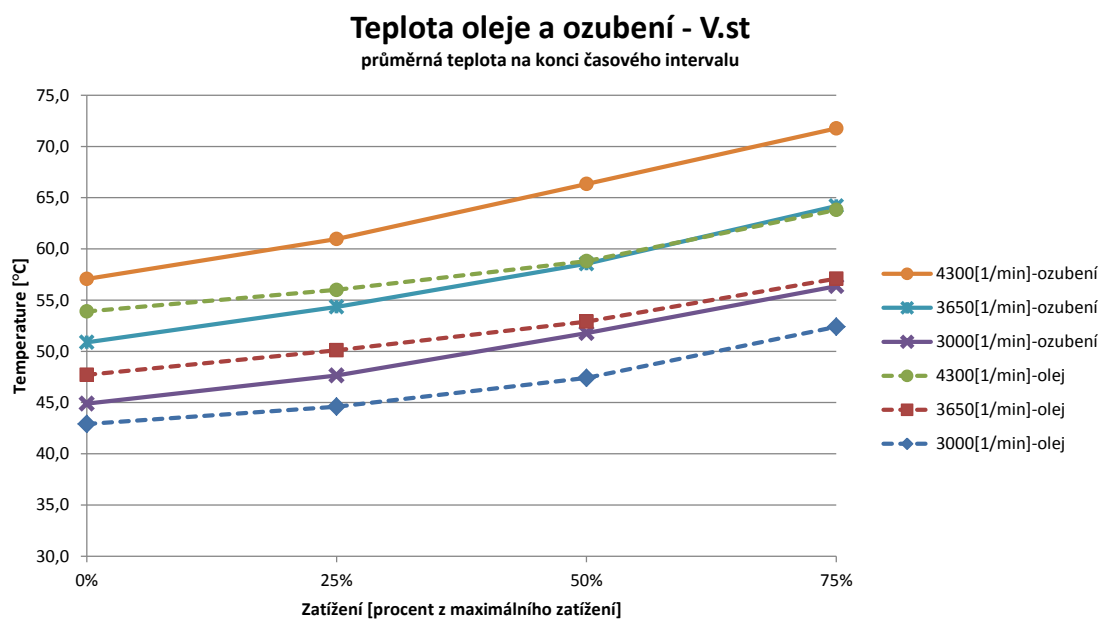
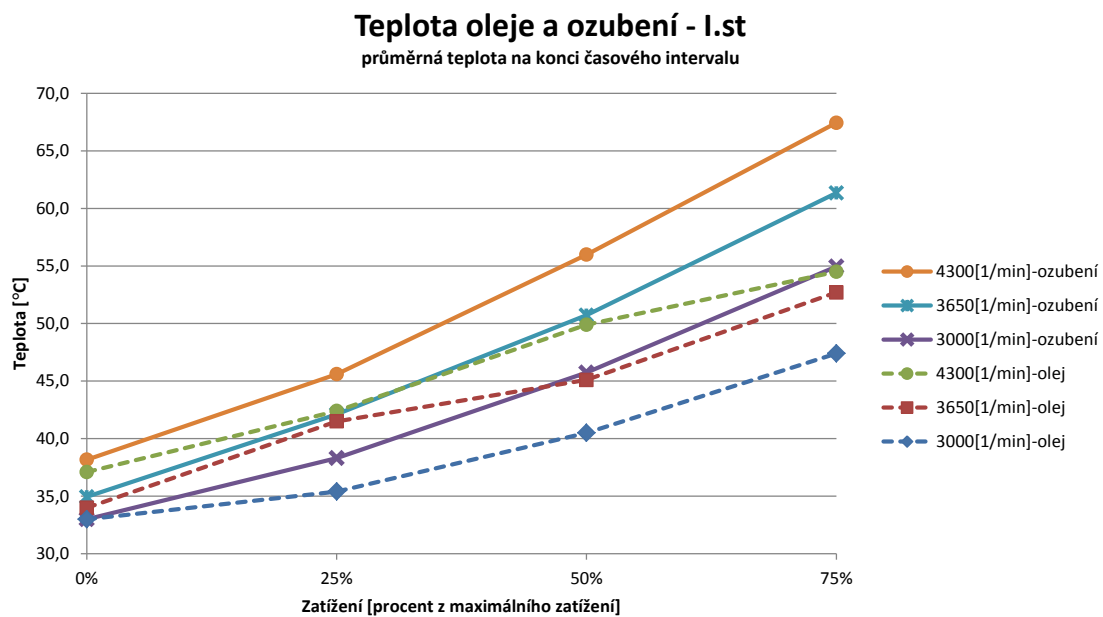
Na diagramech v obrázku 5.8a a 5.8c jsou žlutým kruhem označeny úseky měření, v nichž došlo ke kolísání točivého momentu z důvodů nedokonalé regulace pohonu stavu v daném intervalu - je zde velice dobře patrný vliv změny výkonu na teplotu ozubení. Při měření viz diagram na obrázku 5.8b se zmíněné technické problémy nevyskytly, a proto jsou křivky teplot bez významných rozkolísaností.

Vzhledem k výše uvedeným faktům je možné sledovat průběhy teplot v jednotlivých místech zubů, tuto metodu měření je tedy možné aplikovat i na podrobnější výzkum teplot ozubení.

5.5 Teplota oleje a teplota ozubení

Teplotní stav ozubených kol ovlivňuje řada faktorů, mezi nimiž nelze opomenout vliv teploty oleje. Proto byla teplota oleje během experimentu monitorována. Měření bylo realizováno odporovým snímačem umístěným v olejové zátce skříně převodovky (popsáno v kapitole 4.5.4, zachyceno na obrázku 4.51). Sledování teploty oleje probíhalo zejména pro potvrzení domněnky, že teplota oleje je nižší než teplota ozubení, a ozubení je tedy během provozu převodu skutečně reálným zdrojem tepla, které sdílí do okolí.

Prakticky ve všech režimech provozu se potvrdilo, že průměrná teplota ozubení je vyšší než teplota oleje. Toto tvrzení je podloženo diagramy zachycující průměrnou teplotu ozubení a teplotu oleje na konci měřeného režimu. Diagramy jsou vytvořeny vždy pro jeden rychlostní stupeň a obsahují teploty pro tři zvolené otáčkové režimy v závislosti na zatížení výstupu převodovky. Jako příklad uvádím v obrázku 5.9 diagramy pro první a pátý rychlostní stupeň. Všech pět diagramů je obsaženo v příloze A.6.



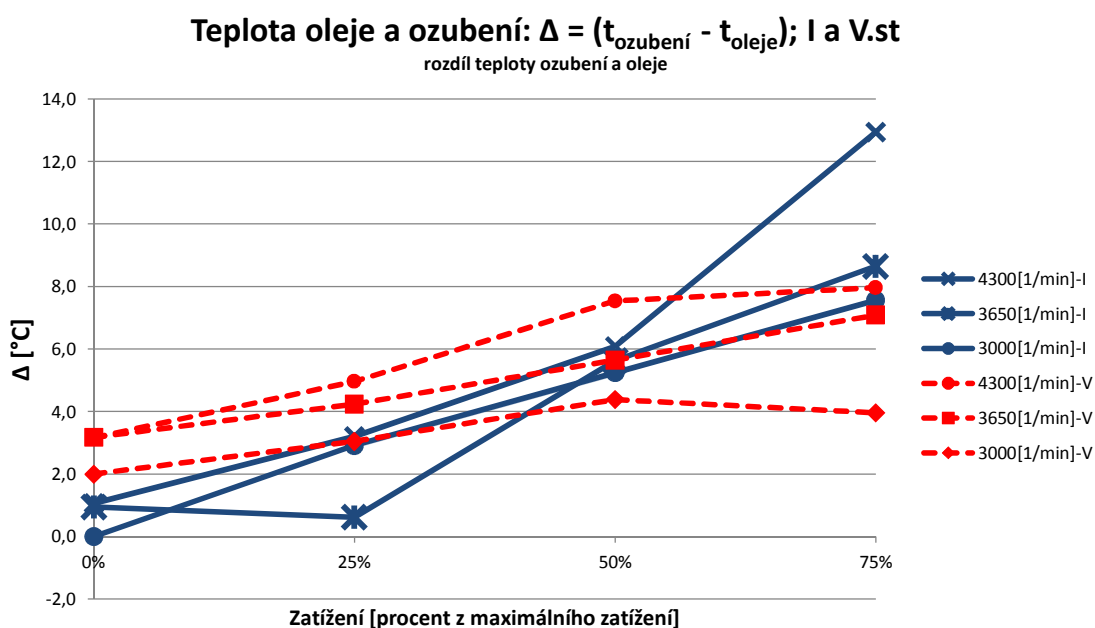
Obrázek 5.9: Teploty oleje a ozubení pastorku na konci sledovaného režimu měření

Největší rozdíl teplot byl zaznamenán při provozu na první rychlostní stupeň, při 4300 min^{-1} a 75% zatížení. Rozdíl teplot činil cca 13°C .

Pro přehlednější interpretaci výsledků jsou v grafu na obrázku 5.10 zaneseny velikosti rozdílů teploty ozubení a teploty oleje (Δ) při provozu na první a pátý rychlostní stupeň (nejnižší a nejvyšší úhlové rychlosti otáčení soukolí stálého převodu). Z tohoto grafu je patrný trend zvyšujícího se rozdílu uvedených teplot v závislosti na zatížení převodovky.

Na základě strmosti zanesených křivek lze prohlásit, že se vzrůstající rychlostí otáčení je vliv zatížení převodovky na velikost diferencí teplot nižší.

Grafy obsahující difference teplot ozubení a teplot oleje při provozu ve všech pěti rychlostních stupních jsou obsaženy v příloze A.7.



Obrázek 5.10: Rozdíl teplot ozubení a teplot oleje v režimech provozu při zařazeném prvním a pátém rychlostním stupni

6 Závěr

Práce byla zaměřena na zkoumání teplotních jevů na ozubení pastorku stálého převodu automobilové převodovky při simulaci provozních podmínek.

Na začátku práce byl zpracován přehled současného stavu řešené problematiky a byly popsány děje probíhající při provozu převodovky, tyto děje buď zapříčiňují vývin tepla, a nebo jsou jím ovlivňovány. Procesy přeměn energií jsou neoddelitelnou součástí provozu převodovky a transformace výkonů mechanickou cestou. S cílem snížit celkovou energetickou náročnost je pochopitelná snaha stále snižovat množství disipované energie, kterou již nelze využít a volně odchází ze systému.

Vzhledem k tomu, že část přenášeného výkonu je disipována, vyvinuté teplo evokuje otázku jakým způsobem je ovlivněna funkce a části převodovky.

K transformaci výkonu v mechanické převodovce je využito vzájemně zabírajících ozubených kol. Boky zubů jsou místem přenosu sil, a tedy velice exponovaným místem co do velikosti působícího kontaktního tlaku a skluzových rychlostí při záběru. Oba děje mají vliv jak na materiál kola, tak i na olejový film. Vyvinuté teplo může negativně ovlivňovat i okolní prostředí tedy olejovou lázeň.

Mezi nejvíce namáhaná soukolí automobilové převodovky patří soukolí stálého převodu, přesněji jeho pastorek. Přestože se v literatuře vyskytuje řada informací o různých modelech, jež mají poskytnout výsledky bilancí výkonu, teplotní analýza konkrétního soukolí automobilové převodovky může být příspěvkem k objasnění této problematiky. Analýze byla podrobena převodovka řady MQ100 firmy Škoda Auto a.s., která je typickým zástupcem skupiny převodovek tohoto druhu.

Proto byl navržen a sestaven laboratorní model zatěžovacího řetězce, který umožnil uskutečnit mnohá měření v podmínkách velmi blízkých reálnému provozu.

Měření teplot bylo provedeno kontaktní metodou v několika místech - přímo v zubech pastorku. Zařízení pro bezkontaktní přenos měřených hodnot bylo vyrobeno a úspěšně využito při měření v laboratoři. Zařízení využívá pro přenos informací infračerveného záření. Jeho funkce byla nejprve testována mimo měřenou převodovku na zkušebním zařízení a byla také provedena kalibrace. Byly navrženy a realizovány konstrukční úpravy a technologické postupy pro zástavbu modulu do převodovky.

Měření probíhalo ve zvolených režimech provozu převodovky za definovaných okolních podmínek. Zkušební režimy byly zvoleny tak, aby pokud možno vystihovaly co největší část režimů běžných při provozu ve vozidle.

V závěrečné části práce byly výsledky z měření shrnuty do okomentovaných diagramů a tabulek. Byly představeny možnosti měření na navrženém a vyrobeném zařízení.

Přílohy obsahují mj. grafické zpracování funkční závislosti teplot na čase, ale i

na zatížení a rychlosti.

Vyhodnoceny byly také maximální průměrné teploty při provozu v devíti různých hladinách výkonu. Jedna výkonová hladina zahrnuje celkem pět rozdílných kombinací velikosti točivého momentu a otáček. Teploty ozubení ze všech pěti měření v hladině byly porovnány a diagramy výsledných hodnot jsou přiloženy.

Pro úplnost byla sestavena tabulka a diagram teplot ozubení na začátku a konci sledovaných úseků měření a to s označením výkonové hladiny a zařazeného rychlostního stupně.

Jako názorná ukázka možností sledování teploty v určitých místech ozubení byl uveden příklad dvou zvolených snímačů. Průběhy teplot měřených snímači v definovaném místě zubu byly vyznačeny v grafech průběhu teplot ozubení v závislosti na otáčkách a zatížení.

Předpoklad, že ozubení kol je během provozu skutečně významným zdrojem tepla potvrzují přiložené diagramy teploty ozubení a teploty oleje v závislosti na zatížení převodovky. Diference obou teplot je přehledně shrnuta v následujících diagramech.

V rámci řešení popsané problematiky bylo navrženo, sestaveno a ověřeno funkce zařízení, které umožňuje provádět další měření v této oblasti. Zařízení by bylo možné upravit a použít ho i pro další měření mechanických veličin např. deformací pomocí tenzometrů. Na diagramech jsou ukázány příklady možností měření. Vzhledem k obsáhlosti dané problematiky by bylo vhodné navázat na tato měření a pokračovat v objasňování tohoto tématu, ke kterému se úzce váží další disciplíny jako je například tribologie - tribodiagnostika, vibrodiagnostika a materiálové inženýrství.

- **Výsledky práce:**

- návrh a sestavení laboratorního zařízení pro zatěžování automobilové převodovky
- návrh a sestavení unikátního zařízení pro měření teplot a přenos dat z rotujících částí
- analýza teplot v ozubení při různých provozních podmínkách

- **Mezi významné poznatky uvedené práce řadím zejména**

- funkčnost navrženého zařízení byla ověřena experimenty, využitelnost zvolené metody byla prokázána
- naměřené teploty ozubení pastorku při zvolených provozních režimech nejsou natolik vysoké aby docházelo k přímé degradaci součástí a oleje
- metoda analýzy teplot je využitelná pro aplikaci v dalších místech převodovky /místa rotujících součástí- tepelná roztažnost hřídelů a kol, změna geometrických tolerancí a stavů napjatosti/
- univerzální využitelnost zařízení pro měření teplot na jiných rotačních součástech strojů

Literatura

- [1] SCHÄFER, M. The New VW up!. *ATZ - Automobiltechnische Zeithammer*. [online]. 2011-07: Springer Science+Business Media, 30.9.2011. ISSN 2192-8800 (online). <http://www.atzonline.com>.
- [2] BHUSHAN, Bharat. *Modern tribology handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001. ISBN 0849384036.
- [3] BOHÁČEK F. a kol. *Části a mechanismy strojů II*: VUT Brno, 1983
- [4] BOHÁČEK F. a kol. *Části a mechanismy strojů III*: VUT Brno, 1983
- [5] BRENDL H. *Wissenspeicher Tribotechnik: Schmierstoffe, Gleitpaarungen, Schmiereinrichtungen*. Leipzig: Fachbuchverlag, 1978. Print.
- [6] DEJL Z. *3. kolokvium centra Josefa Božka*. Praha: Výzkumné centrum spalovacích motorů a automobilů Josefa Božka, 30.1.–31.1.2008,
- [7] DOČKAL A. *Konstrukční optimalizace ozubené převodovky s ohledem na snižování hlukové emise*. Brno: VUT Brno, 2003. ISBN 80-214-2439-7. ISSN 1213-4198. zkrácená verze Ph.D. práce.
- [8] ELSHOUBAGY S. A. M. *Effect of Lubrication on the Quantity of Heat Emission Of Two Spur Gears In Meshing In: Proc. of the Int. Conf. ICAMAME*. Tokyo: WASET, 2012-05-27. Vol:6, pp. 1-26.
- [9] FOLTA Z. *Umístění průhyboměrů při deformačních testech převodovky MQ200*. Ostrava: VŠB v Ostravě, 2006. zpracováno v rámci projektu 1M0568 „Výzkumné centrum spalovacích motorů a automobilů Josefa Božka II“.
- [10] HÖHN B.R. - MICHAELIS K. - OTTO H.P. Influence of immersion depth of dip lubricated gears on power loss, bulk temperature and scuffing load carrying capacity. *International Journal of Mechanics and Materials in Design* [online] 4.2 .2008: 145–156, DOI 10.1007/s10999-007-9045-z
- [11] HÖHN B.R. - MICHAELIS K. - HINTERSTOIBER M. Optimization of gearbox efficiency, *Goriva i maziva*, Zagreb: Hrvatsko društvo za goriva i maziva - GOMA, 2009, GOMABN, Vol.48, No.4, 441-480. ISSN 0350-350X.

- [12] HÖHN B.R. - MICHAELIS K. Influence of oil temperature on gear failures. *Tribology International*. Amsterdam: Elsevier, 2004, Vol.37, 103–109. doi:10.1016/S0301-679X(03)00047-1.
- [13] HOLMBERG K. - ANDERSSON P. - ERDEMIR A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribology International*. Amsterdam: Elsevier, 2011. doi:10.1016/j.triboint.2011.11.022.
- [14] KEJDA P. *Výzkum faktorů ovlivňujících trvanlivost valivých kontaktů*. Brno: VUT v Brně, 2003. zkrácená verze Ph.D. práce.
- [15] KLAPKA M. *Snižování hlukové emise moderní automobilové převodovky*. Brno: VUT v Brně, 2009. Ph.D. práce.
- [16] KOPÁČEK J. *Pohony a převody*. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1992. ISBN 80-7078-137-8.
- [17] KOSÍK M. *Elastohydrodynamické mazání ozubených převodů a jejich životnost*,
- [18] KRAGELSKY I.V. *Tribology Handbook - Friction, Wear, Lubrication*. 1986.
- [19] MARTINSA R.C. - MOURAA P. S. - SEABRAB J.O. MoS₂/Ti Low-friction Coating for Gears In *Tribology International*. Amsterdam: Elsevier, 2006. Vol.39. p.1686–1697. doi:10.1016/j.triboint.2006.02.065.
- [20] MORAVEC V. *Konstrukce strojů a zařízení II- čelní ozubená kola*. Ostrava: Montanex a.s., 2001. ISBN-80-7225-051-5.
- [21] MORAVEC V. - DEJL Z. - NĚMČEK M. - FOLTA Z. - HAVLÍK J. *Čelní ozubená kola v převodovkách automobilů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009. ISBN 978-80-7225-304-3
- [22] MORAVEC V. - TŮMA J. Metoda hodnocení jakosti ozubených soukolí měřením chyby převodu (A METHOD FOR THE GEAR QUALITY ASSESSMENT BASED ON TRANSMISSION ERROR MEASUREMENTS). *MECCA*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. strany 1-10.
- [23] NEALE M.J. *The Tribology Handbook*. 1995.
- [24] NEUPAUEROVÁ S. - HAVALDOVÁ M. Aplikácia CAD při tvorbe modelu ozubení pre vyšetrovanie deformácií zubov ozubených kolies. *Acta Metallurgica Slovaca*. Košice: Technická univerzita v Košicích, 2003. Vol.9.. No.2. p.131 - 138. ISSN 1338-1156.
- [25] OLIVA V. - OLEXA J. *Úvod do teorie tření, opotřebení a kontaktního porušování*. Praha: CVUT v Praze, 1978.

- [26] PETRY-JOHNSON T.T. - KAHRAMAN A. - ANDERSON N.E. - CHASE D.R. Experimental investigation of spur gear efficiency, *In Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering, Conference IDETC/CIE 2007*. Las Vegas - Nevada: September 4-7/2007. USA DETC2007-35045.
- [27] PROCHÁZKA J. *Teplotní analýzy násuvné převodovky s využitím CAx metod*. Brno: VUT v Brně, 2004. zkrácená verze Ph.D. práce.
- [28] RAO S.B. - MCPHERSON D.R. Gear tooth temperature measurements. *Gear Solutions*. Pelham - Alabama: Gear Solutions Magazine, August 2009.
- [29] RUDNEV V. Induction Hardening of Gears and Critical Components Part II. *Gear Technology*. Elk Grove Village - Illinois: Randall Publications LLC, November/December 2008. www.geartechnology.com.
- [30] STOLARSKI T.A. *Tribology in Machine Design*. Oxford; Butterworth-Heinemann, 1990. ISBN 9780750636230.
- [31] Škoda Auto a.s.: materiály poskytované firmou.
- [32] ŠTĚPINA V. - VESELÝ V. *Maziva v tribologii*. Bratislava: Veda, 1985.
- [33] ŠVEC V. *Části a mechanismy strojů - mechanické převody*. Praha: ČVUT v Praze, 2003.
- [34] TAKEUCHI T. - TOGAI K. Gear whine analysis with virtual power train. *Mitsubishi Motors Technical Review*. Tokio: Mitsubishi Motors, 2004.
- [35] VINŠ J. *Kluzná ložiska* Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1971.

Seznam publikací autora souvisejících s řešenou problematikou

- [A.1] MAZAČ, M. – MALÝ, M. The MQ100 Gearbox Final Drive Pinion Gearing Temperatures. In Sborník příspěvků - 57th International Conference of Machine Design Departments (ICMD 2016). Železná Ruda: Západočeská univerzita v Plzni, 7.-9.9.2016. pozn. - akceptováno.
- [A.2] MAZAČ, M. – MALÝ, M. The Pinion Teeth Temperatures Measured during the Different Power Levels Operation. In Sborník příspěvků - XII. International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms (TMM 2016). Liberec: Technická univerzita v Liberci, 6.-8.9.2016. pozn. - akceptováno.
- [A.3] MAZAČ, M. – HERAJN, P. – SVOBODA, M. The Equipment for Temperature Measurement Near a Gear Tooth Flank. In The Latest Methods of Construction Design. Germany: Springer Science+Business Media, 2015. DOI 10.1007/978-3-319-22762-7-69, ISBN 978-3-319-22761-0, str.457-463.
- [A.4] MAZAČ, M. Zařízení pro měření teplot v blízkosti boků zubů ozubených kol – konstrukční řešení a stavba zařízení. In Sborník příspěvků- Studentská vědecká a odborná činnost 2015. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 3.6.2015. ISBN 978-80-7494-209-9.
- [A.5] MAZAČ, M. - HERAJN, P. - SVOBODA, M. The Gear Tooth Flank Temperature Measurements System. Transactions on Electrical Engineering Vol. 4. [online]. Praha: ČVUT v Praze, 2015. No.1. p. 27-30. ISSN 1805-3386.
- [A.6] MAZAČ, M. – HERAJN, P. – SVOBODA, M. The Equipment for Temperature Measurements near a Gear Tooth Flank. In Sborník příspěvků - 55th International Conference of Machine Design Departments (ICMD2014). Be-roun: ČVUT v Praze, 9.-12.9.2014. ISBN 978-80-01-05542-7
- [A.7] MAZAČ, M. Měření teplot ozubených kol v reálném provozu. In Sborník příspěvků - Studentská vědecká a odborná činnost 2014. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 28.5.2014. ISBN 978-80-7494-071-2
- [A.8] MAZAČ, M. – HERAJN, P. Zařízení pro měření teplot v ozubených kolech. In Sborník příspěvků 2. ročníku konference Konstruování - Green Engineering. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 26.11.2013. ISBN 978-80-7494-035-4

- [A.9] MAZAČ, M. Stand for Measuring Temperatures of the Main Gears of Automobile Differential. In Modern Methods of Construction Design, Book Series: Lecture Notes in Mechanical Engineering, Edited by: Sevcik, L; Lepsik, P; Petru, M; Masin, I; Martonka, R. Germany: Springer Science+Business Media, 2014. DOI : 10.1007/978 – 3 – 319 – 05203 – 8 – 20, pages: 139-144.
- [A.10] MAZAČ, M. Stand for Measuring Temperatures of the Main Gears of Automobile Differential. In Sborník příspěvků 54th International Conference of Machine Design Departments. Hejnice: Technická univerzita v Liberci, 10.-12.9.2013. ISBN 978-80-7372-986-8
- [A.11] MAZAČ, M. Disipace energie v mechanických převodovkách. In Sborník příspěvků z INInet- Národní tandemová konference- Konstruování- Green Engineering. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 15.11.2012. ISBN-78-80-7372-937-0
- [A.12] MAZAČ, M. Stav pro měření provozních hodnot převodovky MQ100, In Sborník Workshopu Světlanka 2012. Rokytnice nad Jizerou: Technická univerzita v Liberci, 17.-20. září 2012. ISBN 978-80-7372-891-5

Seznam ostatních publikací autora

- [B.1] STOLCPARTOVA, J. – PECHOUT, M. – DITTRICH, L. - MAZAC, M. - FENKL, M. - VRBOVA, K. – ONDRACEK, J. - VOJTISEK-LOM, M. Internal Combustion Engines as the Main Source of Ultrafine Particles in Residential Neighborhoods: Field Measurements in the Czech Republic. *Atmosphere* 2015 6(11). [online].: Basel, 2015. p.1714-1735. doi:10.3390/atmos6111714. 5-Year Impact Factor: 1.517 (2015).
- [B.2] VOJTÍŠEK, M. - BERÁNEK, V. - KLÍR, V. - PECHOUT, M. - MAZAČ, M. - DITTRICH, L. Effect of Alcohol Blending on Real Driving Emissions of Particulate Matter from Ordinary Gasoline Automobile Engines: A Comparison among Ethanol, n-butanol and Isobutanol. In *Sborník konference BIOTRETH*. Krakow: Oil and Gas Institute - National Research Institute (Polsko), 25.-26.11.2015.
- [B.3] PECHOUT, M. – DITTRICH, A. – MAZAČ, M. – VOJTÍŠEK, M. Real Driving Emissions of Two Older Ordinary Cars Operated on High-Concentration Blends of N-Butanol and ISO-Butanol with Gasoline. In *SAE Technical Paper*. Capri: SAE Naples, 13. – 17. 9. 2015. 2015-24-2488. doi:10.4271/2015-24-2488. prezentováno na SAE ICE 2015.
- [B.4] MAZAČ, M. Konstrukce a výroba stavu pro měření provozních parametrů převodovky MQ100. In *Sborník příspěvků- Workshop pro doktorandy fakulty textilní a fakulty strojní TUL*. Rokytnice nad Jizerou: Technická univerzita v Liberci, 18.-20. září 2013. ISBN-978-80-7372-987-5.
- [B.5] VOJTISEK-LOM, M. - PECHOUT, M. - MAZAC, M. Real-world on-road exhaust emissions from an ordinary gasoline car operated on E85 and on butanol-gasoline blend. In *SAE Technical Papers*. Capri: SAE Naples, 2013. No.6. DOI: 10.4271/2013-24-0102.
- [B.6] VOJTISEK-LOM, M. - PECHOUT, M. - MAZAC, M. Measurement of consumption rates of viscous biofuels. *Fuel*. Amsterdam: Elsevier , 2013. 107. pp. 448-454. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.11.025.
- [B.7] VOJTÍŠEK-LOM, M. – PECHOUT, M. – MAZAČ, M. – DITTRICH, L. – FENKL, M. High-Volume Combustion Aerosol Sampling Using Tandem

Atmospheric Samplers. In Sborník příspěvků 17th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles. Zürich: ETH Zürich - Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 23.-26.6.2013. ISBN 978-3-033-04114-1.

- [B.8] PECHOUT, M. - MAZAČ, M. - VOJTÍŠEK-LOM, M. Effect of Higher Content N-Butanol Blends on Combustion, Exhaust Emissions and Catalyst Performance of an Unmodified SI Vehicle Engine. Society of Automotive Engineers Technical Paper Series.: SAE, 2012. ISSN 0148-7191. Paper No. 2012-01-1594. doi: 10.4271/2012-01-1594.
- [B.9] TOPINKA, J. – MILCOVA, A. – SCHMUCZEROVA, J. – MAZAC, M. – PECHOUT, M. - VOJTÍŠEK-LOM, M. Genotoxic potential of organic extracts from particle emissions of diesel and rapeseed oil powered engines. Toxicology Letters. [online]. Amsterdam.: Elsevier, 2012, 212, 11-17. ISSN: 0378-4274, (5-Year Impact Factor: 3.605).
- [B.10] VOJTÍŠEK, M. - MAZAČ, M. - LAURIN, J. Výfukové škodliviny konstrukčně neupraveného motoru na bioetanolové palivo E-85. Listy cukrovarnické a řepařské 4/2012. Praha: VUC Praha, a.s., 4/2012. ISSN- 1210-3306.
- [B.11] VOJTÍŠEK, M. - PECHOUT, M. - MAZAČ, M. - DITTRICH, A. - ČIHÁK, M. Particulate matter measurement with an improvised full-flow dilution tunnel. In Sborník XLII. International Scientific Conference of Czech and Slovak University Departments and Institutions dealing with the research of combustion engines (KOKA 2011). Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 8.-9.9.2011. pozn. vyšlo v časopise Technológ 3-2011, ISSN 1337-8996.
- [B.12] VOJTÍŠEK, M. - DITTRICH, A. - MAZAČ, M. - DUFEK, M. - FENKL, M. On-road particulate matter emissions from homogeneous charge spark ignition engines. In Sborník XLII. International Scientific Conference of Czech and Slovak University Departments and Institutions dealing with the research of combustion engines (KOKA 2011). Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 8.-9.9.2011. pozn. vyšlo v časopise Technológ 3-2011, ISSN 1337-8996.
- [B.13] MAZAČ M. Měření emisí spalovacích motorů v reálném provozu. In Sborník příspěvků - Workshop doktorandů Světlanka 2011. Rokytnice nad Jizerou: Technická univerzita v Liberci, 19.-22.9.2011. ISBN-978-80-7372-765-9.
- [B.14] PECHOUT, M. - MAZAČ, M. - VOJTÍŠEK, M Comparison of effects caused by utilizing rapeseed oil as a fuel for a modern and an older design diesel engine – part B: exhaust emissions. In Sborník XLII. International Scientific Conference of Czech and Slovak University Departments and Institutions dealing with the research of combustion engines (KOKA 2011). Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 8.-9.9.2011. pozn. vyšlo v časopise Technológ 3-2011, ISSN 1337-8996.

- [B.15] MAZAČ M. - VOJTÍŠEK-LOM, M. „Ordinary“ gasoline car operated on E-85 fuel as a measure for lower exhaust emissions. In Sborník XLII. International Scientific Conference of Czech and Slovak University Departments and Institutions dealing with the research of combustion engines (KOKA 2011). Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 8.-9.9.2011. pozn. vyšlo v časopise Technológ 3-2011, ISSN 1337-8996.
- [B.16] VOJTÍŠEK-LOM, M. - TOPINKA, J. - FENKL, M. - MAZAČ, M. Real-world Exhaust Emissions in Congested Urban Areas. In Sborník 15th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles. Zurich: ETH Zurich, 26.-29.6.2011.
- [B.17] TOPINKA, J. - MILCOVA, A. - SCHMUCZEROVA, J. - MAZAC, M. - PECHOUT, M. - VOJTISEK-LOM, M. Comparison of Genotoxicity of Exhaust from a Diesel, Biodiesel and Rapeseed Oil Powered Engine – pilot study. 15th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich, Switzerland, June 26-29, 2011
- [B.18] MAZAČ, M. - VOJTÍŠEK-LOM, M. Exhaust gases produced in highway traffic by passenger car with speed control. In Sborník IDS 2011. Smolenice: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 15.-17.5.2011. ISBN 978-80-8096-145-9.
- [B.19] VOJTÍŠEK, M. - PECHOUT, M. - MAZAČ, M. Experimental Investigation Of Rapeseed Oil Combustion In A Modern Common-Rail Diesel Engine. Society of Automotive Engineers Technical Paper Series. Capri: SAE Naples, 11.-15.9.2011. ISSN 0148-7191. rukopis č. 11ICE-0304.
- [B.20] VOJTÍŠEK-LOM, M. - MAZAČ, M. - LOZANO, R.E. Particulate matter emissions from a winter operation of a modern on-road diesel engine powered by heated rapeseed oil. In Sborník European Aerosol Conference 2011 – EAC 2011. Manchester: The Aerosol Society, UK. 4.-9.9.2011.
- [B.21] ŠKRDLÍKOVÁ, L. - VOJTÍŠEK, M. - PROKEŠ, R. - LIŠKOVÁ, H. - AUDY, O. - KUKUČKA, P. - KURKOVÁ, R. - MAZAČ, M. - LOZANO, R.E. - KLÁNOVÁ, J. Zlepší používání alternativních paliv kvalitu našeho ovzduší?. In Sborník konference Ovzduší 2011. Brno: Centrum pro výzkum toxických látek v prostředí – Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity. 3.-6.4.2011.
- [B.22] VOJTÍŠEK, M. - KOTEK, M. - FENKL, M. - MAZAČ, M. Výfukové emise ze silničních vozidel při narušené plynulosti toku dopravy. In Sborník konference Ovzduší 2011. Brno: Centrum pro výzkum toxických látek v prostředí – Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity. 3.-6.4.2011.

A Přílohy

A.1 Tabulka zkušebních režimů

I.st. $i_c=14,18$	n mot. [min^{-1}]											
	3000[min^{-1}]				3650[min^{-1}]				4300[min^{-1}]			
zatížení	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]
0%	49	0,00	211,45	0,00	53	0,00	257,26	0,00	57	0,00	303,07	0,00
25%	50	336,96	211,45	7,46	54	336,96	257,26	9,07	58	336,96	303,07	10,69
50%	51	673,93	211,45	14,92	55	673,93	257,26	18,15	59	673,93	303,07	21,38
75%	52	1010,89	211,45	22,37	56	1010,89	257,26	27,22	60	1010,89	303,07	32,07

II.st. $i_c=7,61$	n mot. [min^{-1}]											
	3000[min^{-1}]				3650[min^{-1}]				4300[min^{-1}]			
zatížení	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]
0%	25	0,00	394,09	0,00	29	0,00	479,48	0,00	33	0,00	564,86	0,00
25%	26	180,80	394,09	7,46	30	180,80	479,48	9,07	34	180,80	564,86	10,69
50%	27	361,59	394,09	14,92	31	361,59	479,48	18,15	35	361,59	564,86	21,38
75%	28	542,39	394,09	22,37	32	542,39	479,48	27,22	36	542,39	564,86	32,07

III.st. $i_c=4,94$	n mot. [min^{-1}]											
	3000[min^{-1}]				3650[min^{-1}]				4300[min^{-1}]			
zatížení	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]
0%	13	0,00	606,38	0,00	17	0,00	737,77	0,00	21	0,00	869,15	0,00
25%	14	117,50	606,38	7,46	18	117,50	737,77	9,07	22	117,50	869,15	10,69
50%	15	235,00	606,38	14,92	19	235,00	737,77	18,15	23	235,00	869,15	21,38
75%	16	352,50	606,38	22,37	20	352,50	737,77	27,22	24	352,50	869,15	32,07

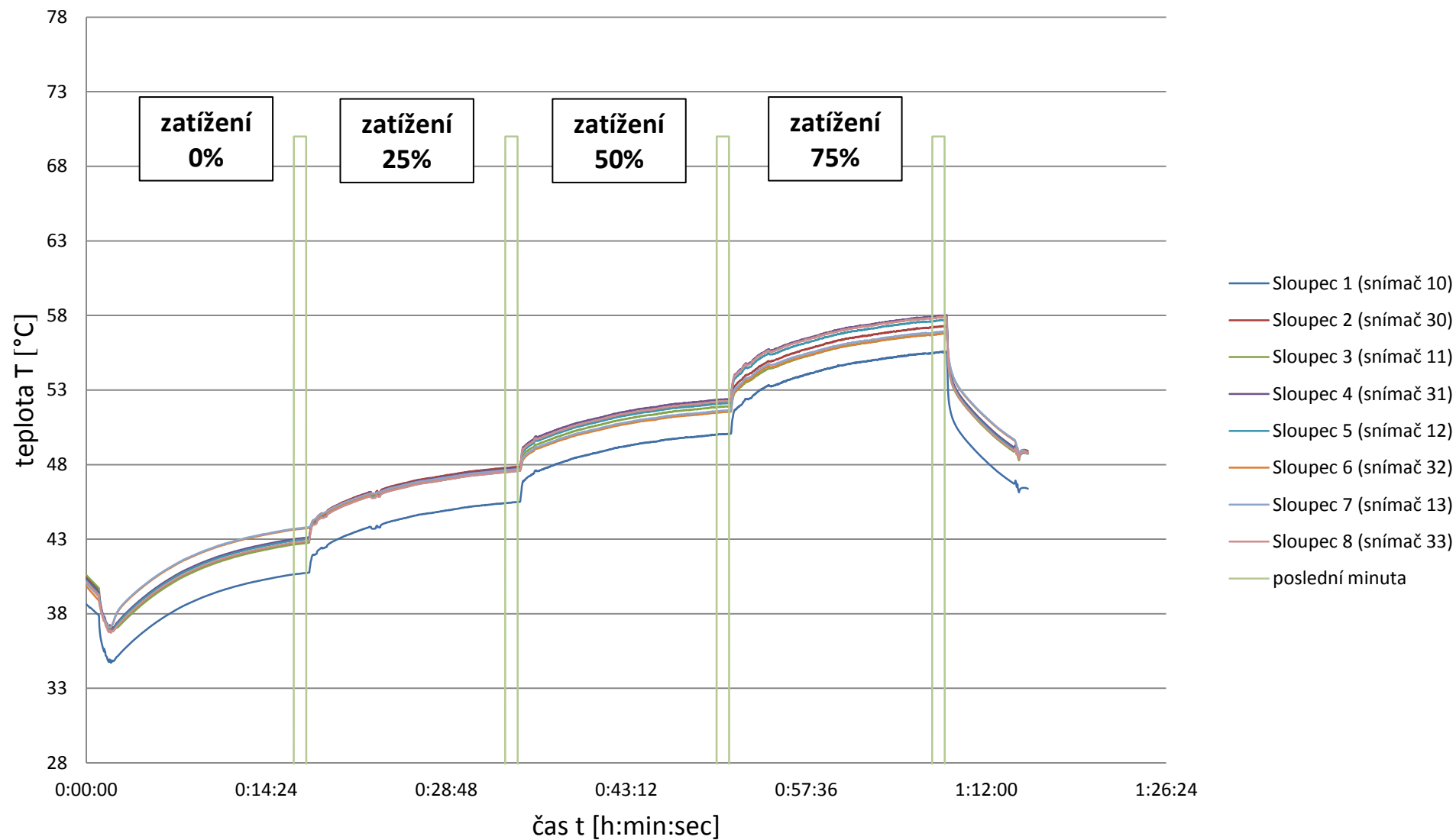
IV.st. $i_c=3,73$	n mot. [min^{-1}]											
	3000[min^{-1}]				3650[min^{-1}]				4300[min^{-1}]			
zatížení	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]
0%	1	0,00	803,05	0,00	5	0,00	977,04	0,00	9	0,00	1151,04	0,00
25%	2	88,72	803,05	7,46	6	88,72	977,04	9,07	10	88,72	1151,04	10,69
50%	3	177,45	803,05	14,92	7	177,45	977,04	18,15	11	177,45	1151,04	21,38
75%	4	266,17	803,05	22,37	8	266,17	977,04	27,22	12	266,17	1151,04	32,07

V.st. $i_c=3,10$	n mot. [min^{-1}]											
	3000[min^{-1}]				3650[min^{-1}]				4300[min^{-1}]			
zatížení	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]	č.	M_k výstup [Nm]	n výstup [min^{-1}]	P výstup [kW]
0%	37	0,00	967,32	0,00	41	0,00	1176,90	0,00	45	0,00	1386,49	0,00
25%	38	73,66	967,32	7,46	42	73,66	1176,90	9,07	46	73,66	1386,49	10,69
50%	39	147,31	967,32	14,92	43	147,31	1176,90	18,15	47	147,31	1386,49	21,38
75%	40	220,97	967,32	22,37	44	220,97	1176,90	27,22	48	220,97	1386,49	32,07

A.2 Základní grafy průběhů teplot

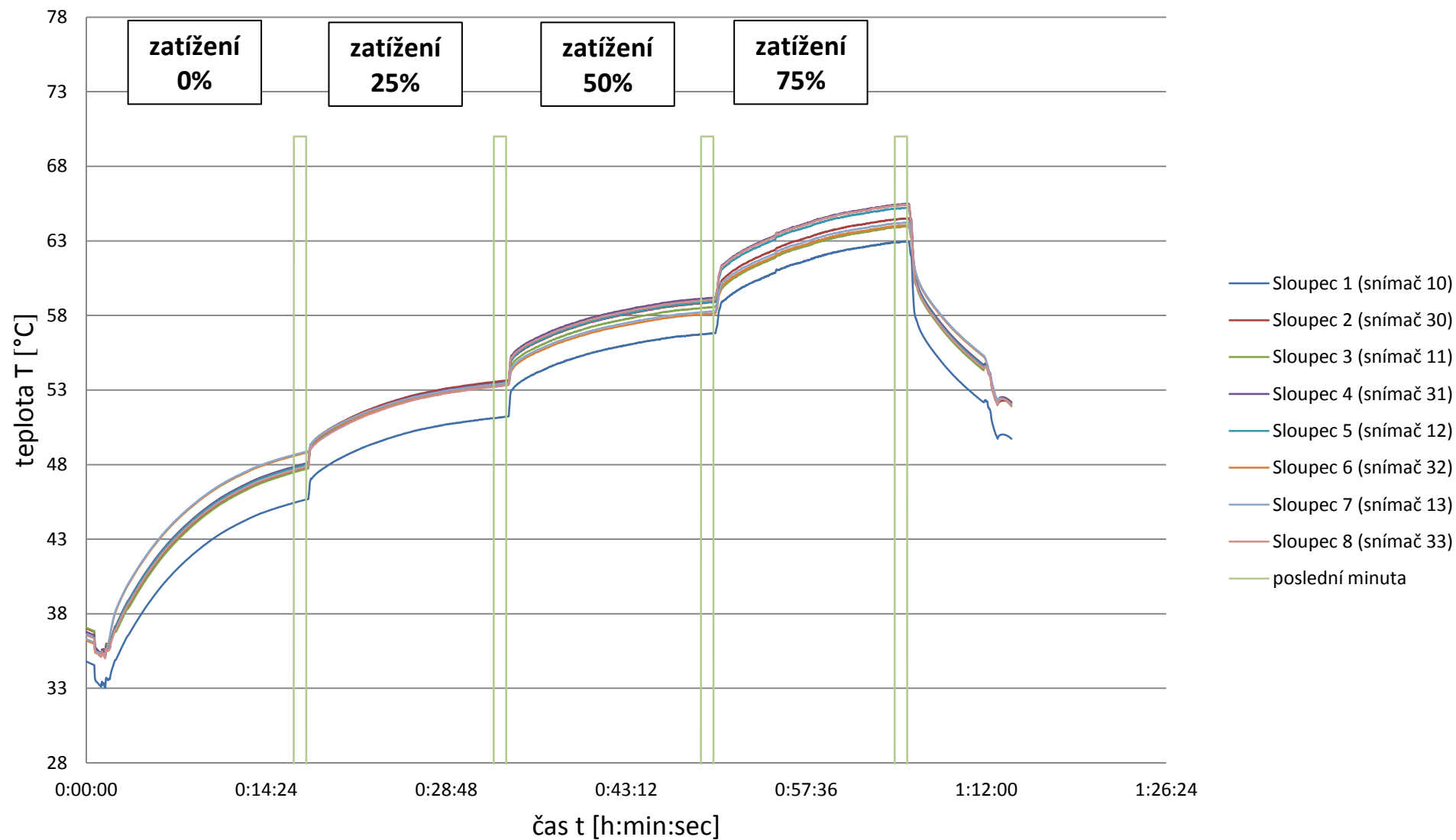
Průběhy teplot v režimech č.1-4

IV.st, 3000min⁻¹



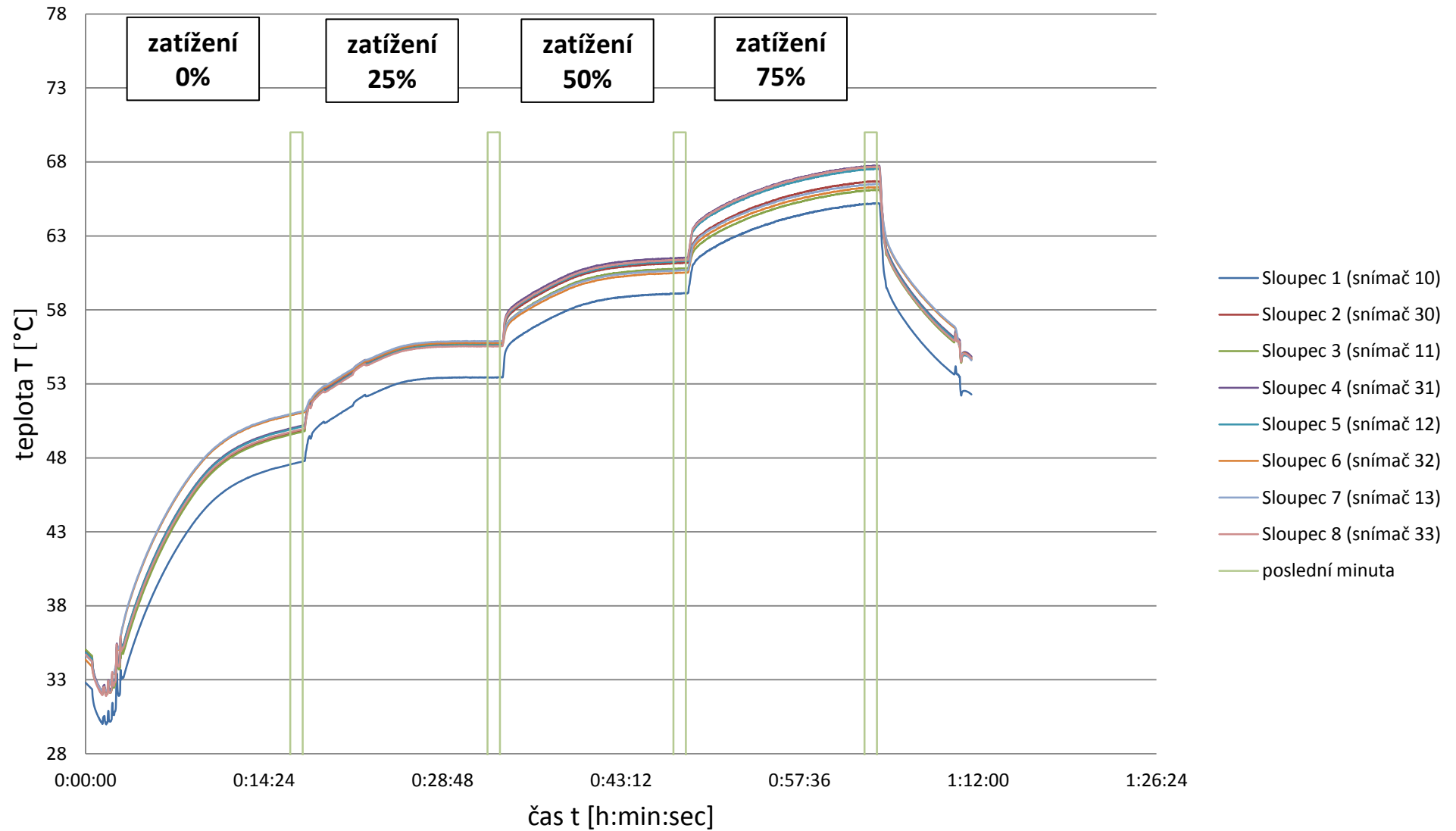
Průběhy teplot v režimech č.5-8

IV.st, 3650min⁻¹



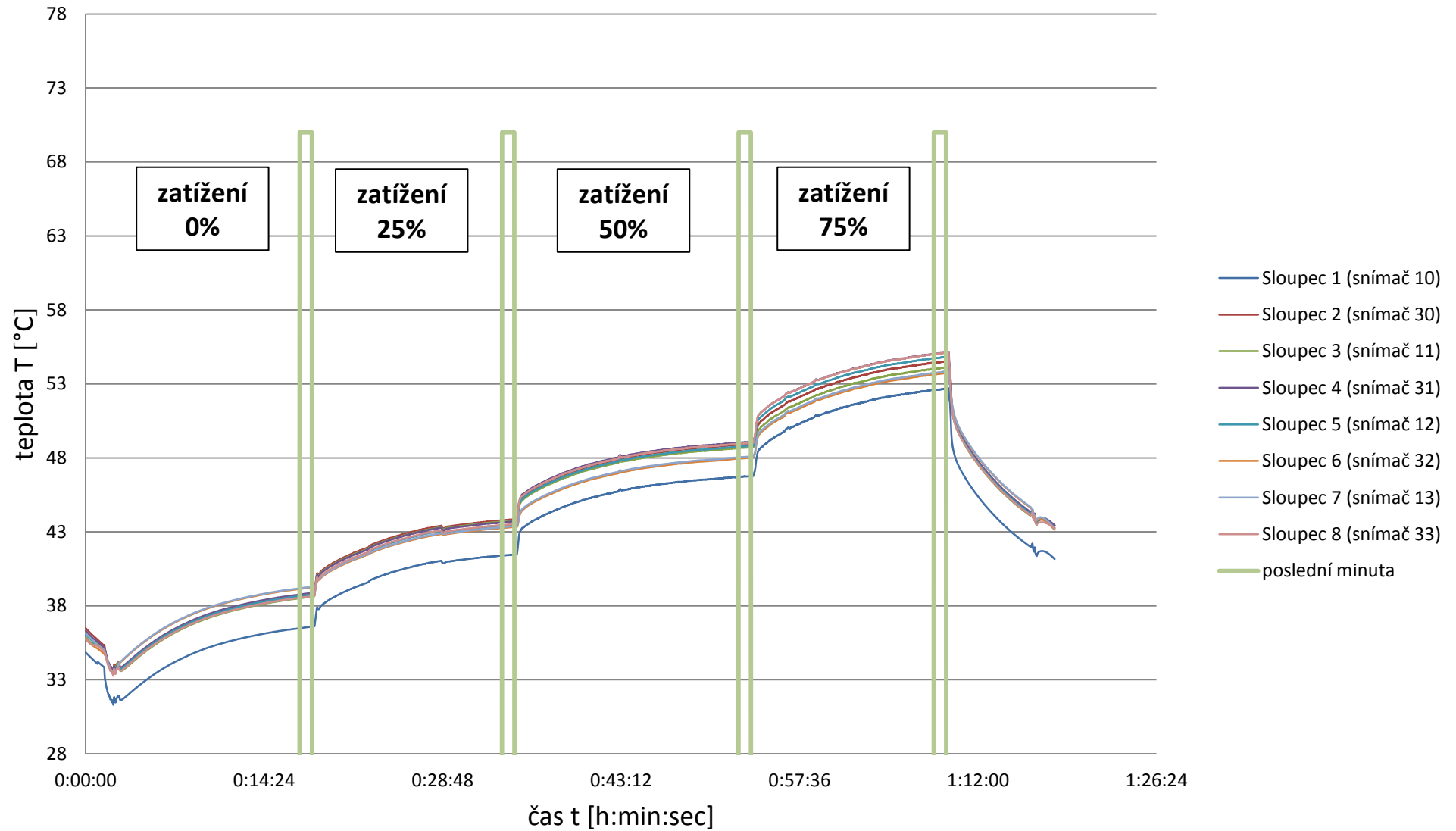
Průběhy teplot v režimech č.9-12

IV.st, 4300min⁻¹



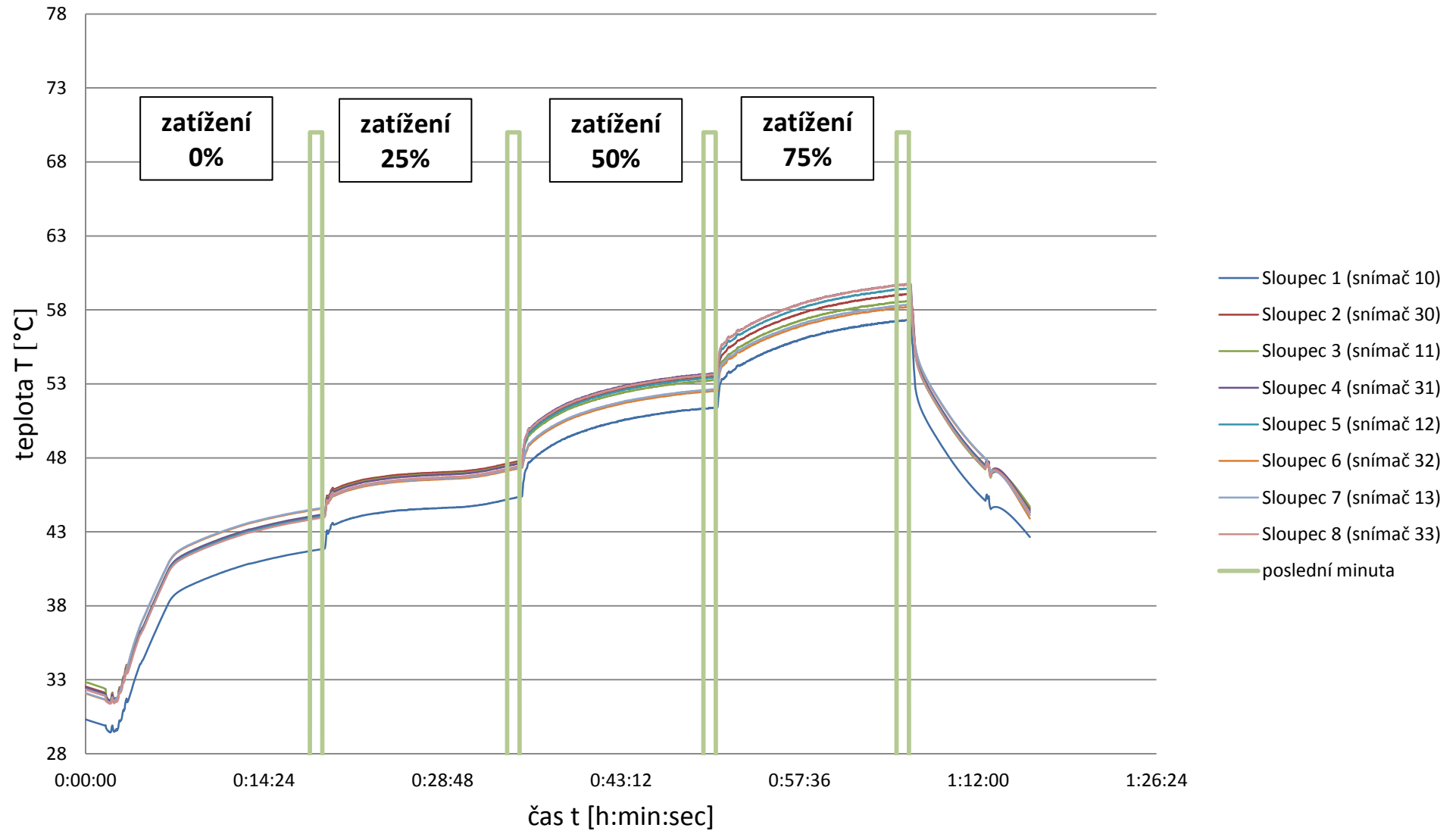
Průběhy teplot v režimech č.13-16

III.st, 3000min⁻¹



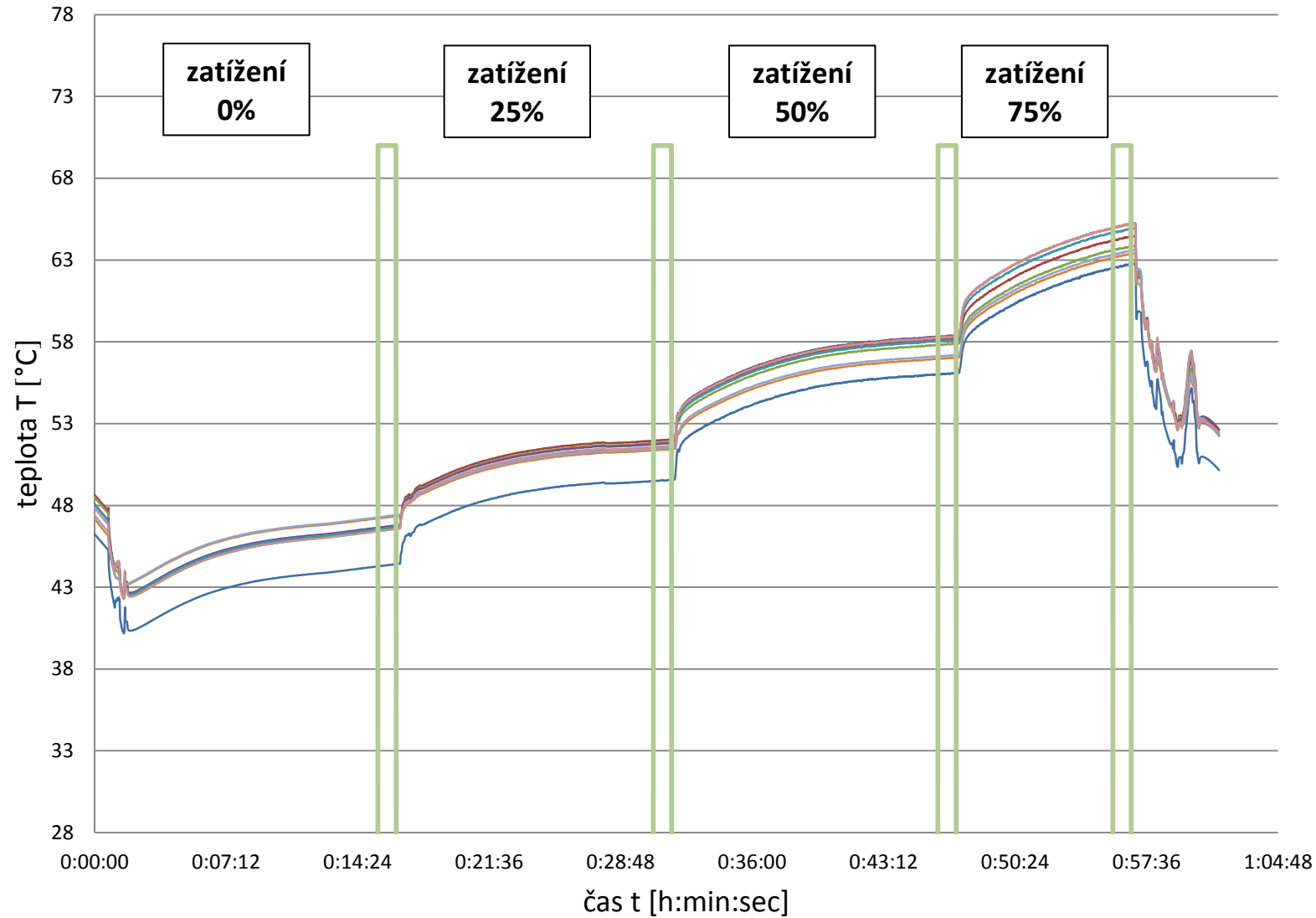
Průběhy teplot v režimech č.17-20

III.st, 3650min⁻¹



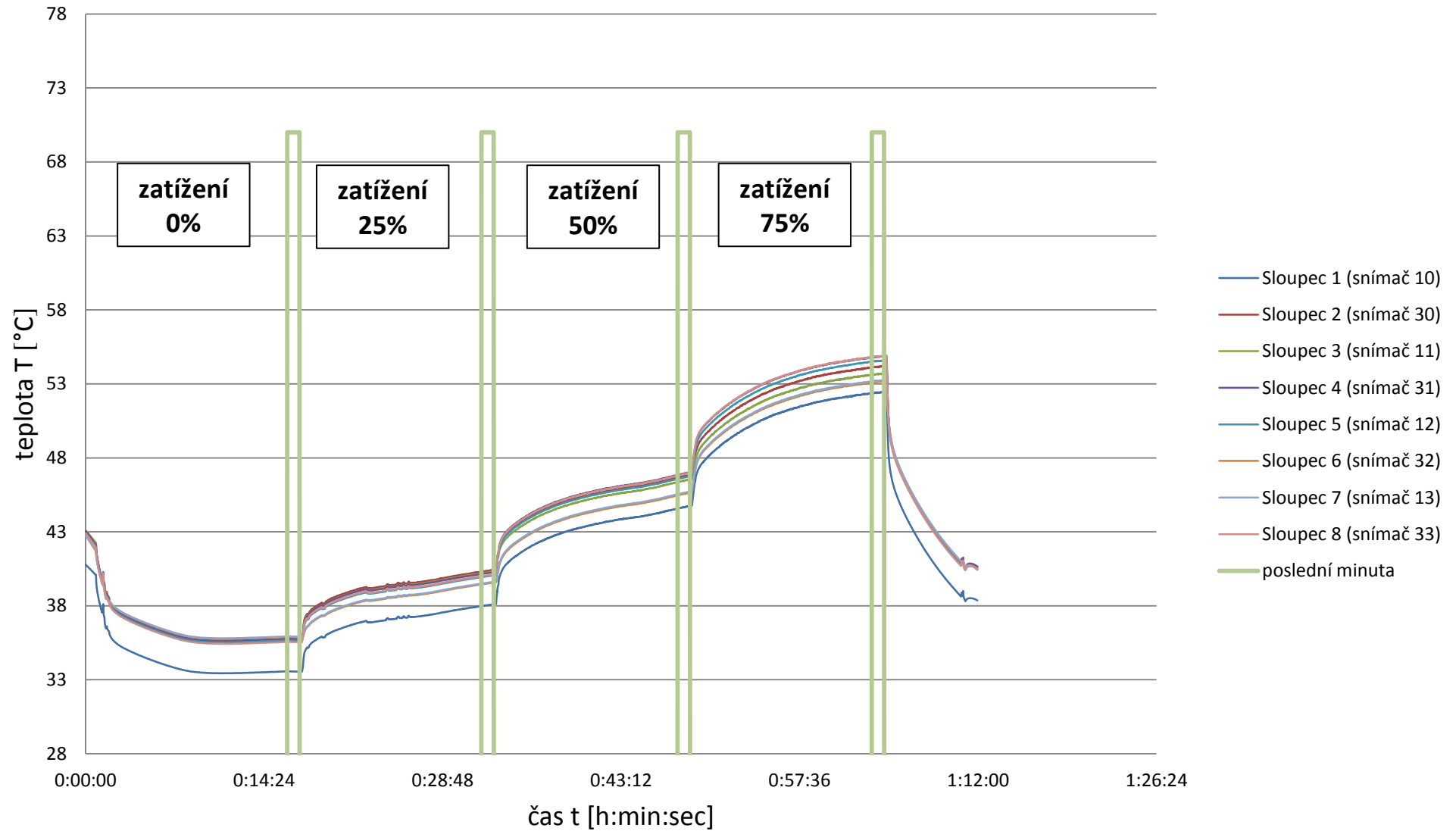
Průběhy teplot v režimech č.21-24

III.st, 4300min⁻¹



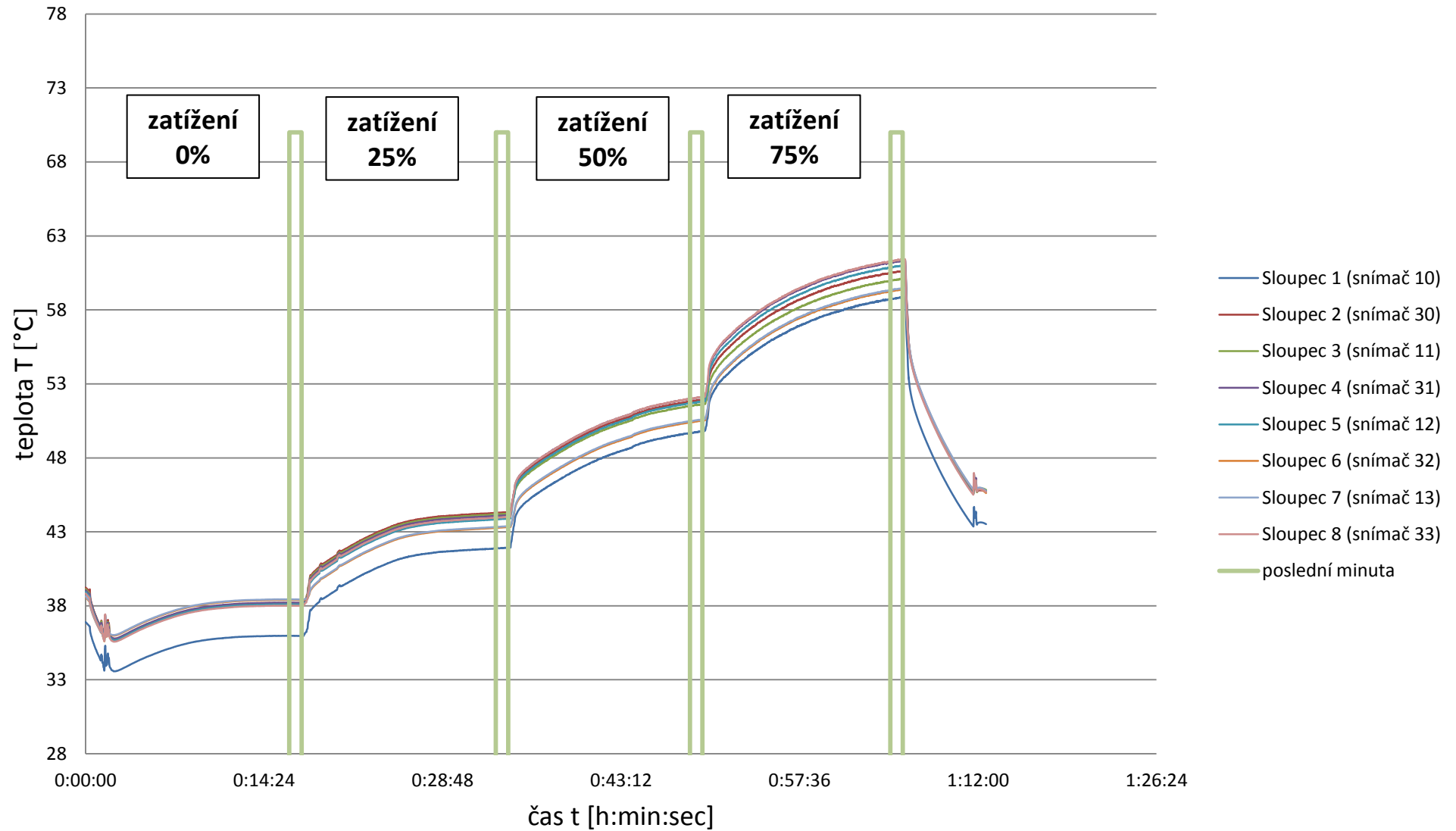
Průběhy teplot v režimech č.25-28

II.st, 3000min⁻¹



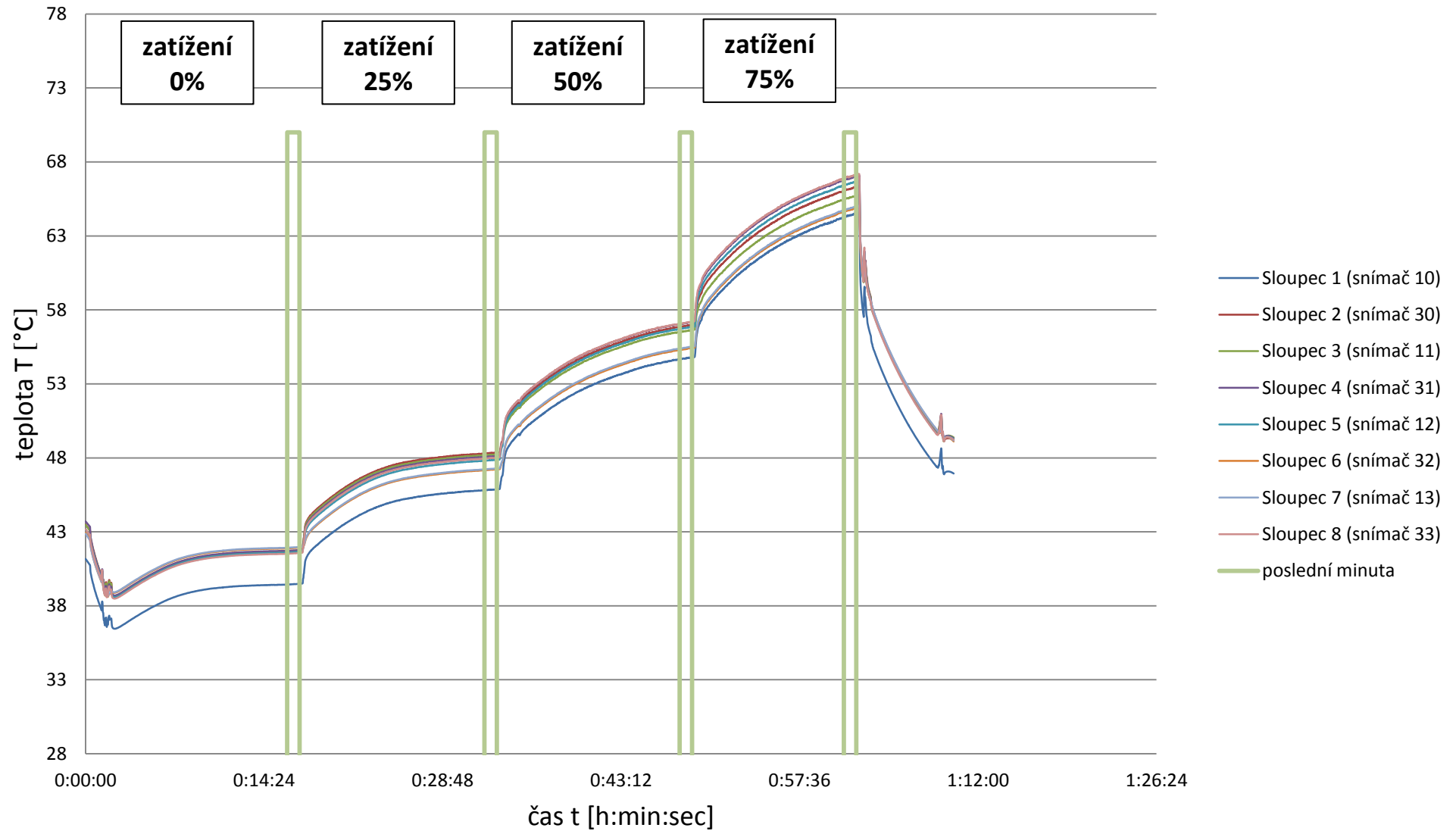
Průběhy teplot v režimech č.29-32

II.st, 3650min⁻¹



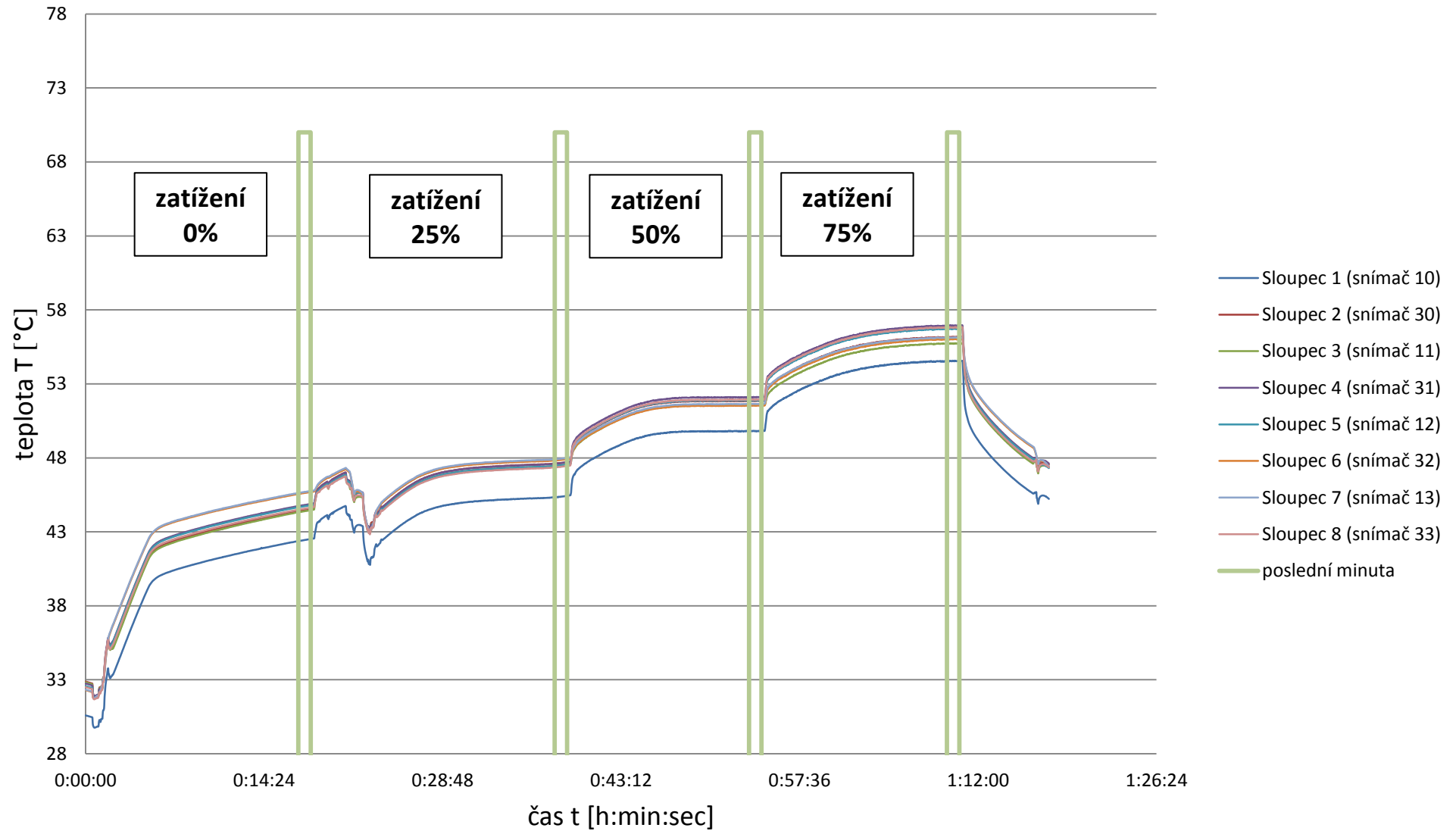
Průběhy teplot v režimech č.33-36

II.st, 4300min⁻¹



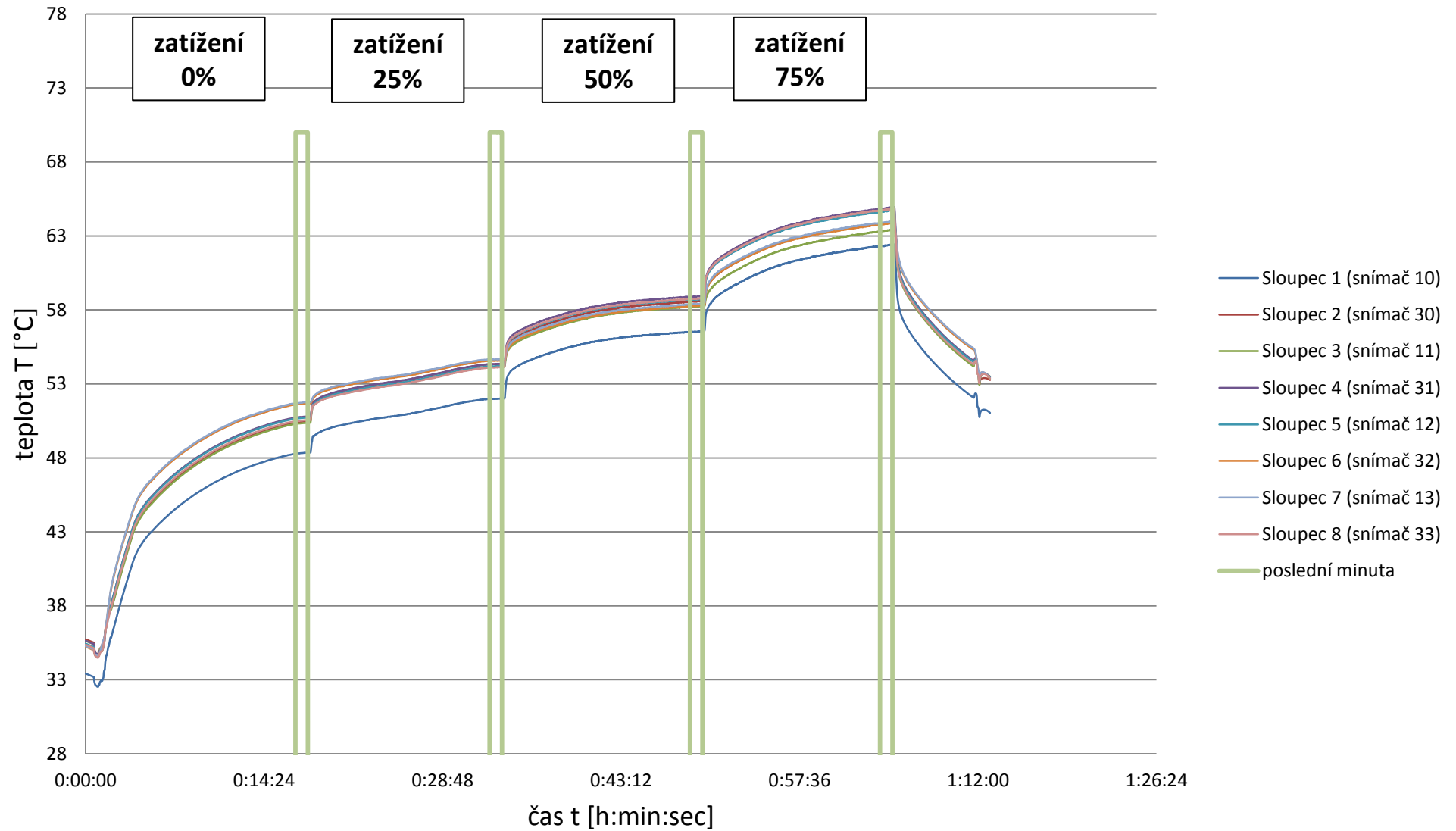
Průběhy teplot v režimech č.37-40

V.st, 3000min⁻¹



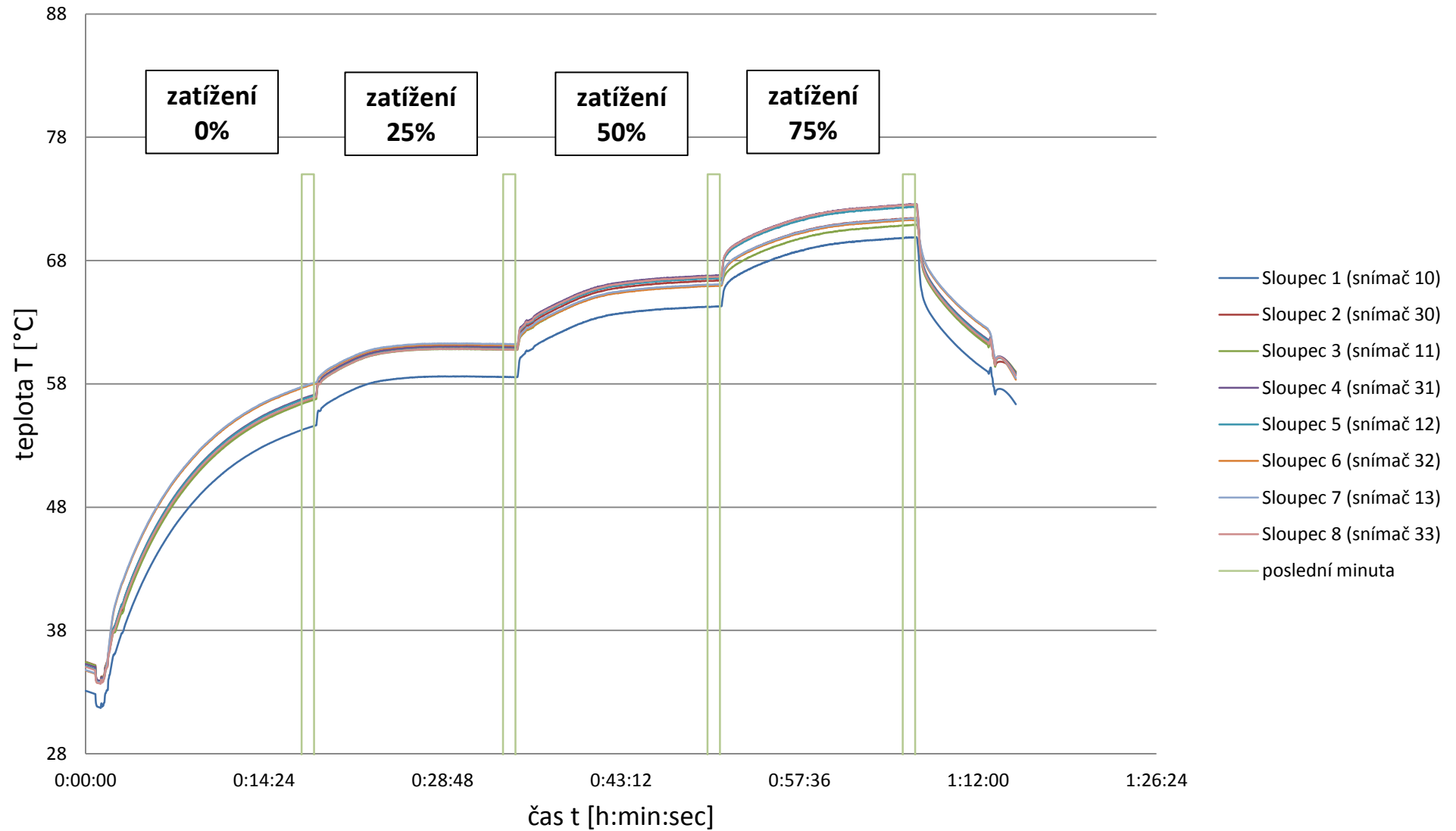
Průběhy teplot v režimech č.41-44

V.st, 3650min⁻¹

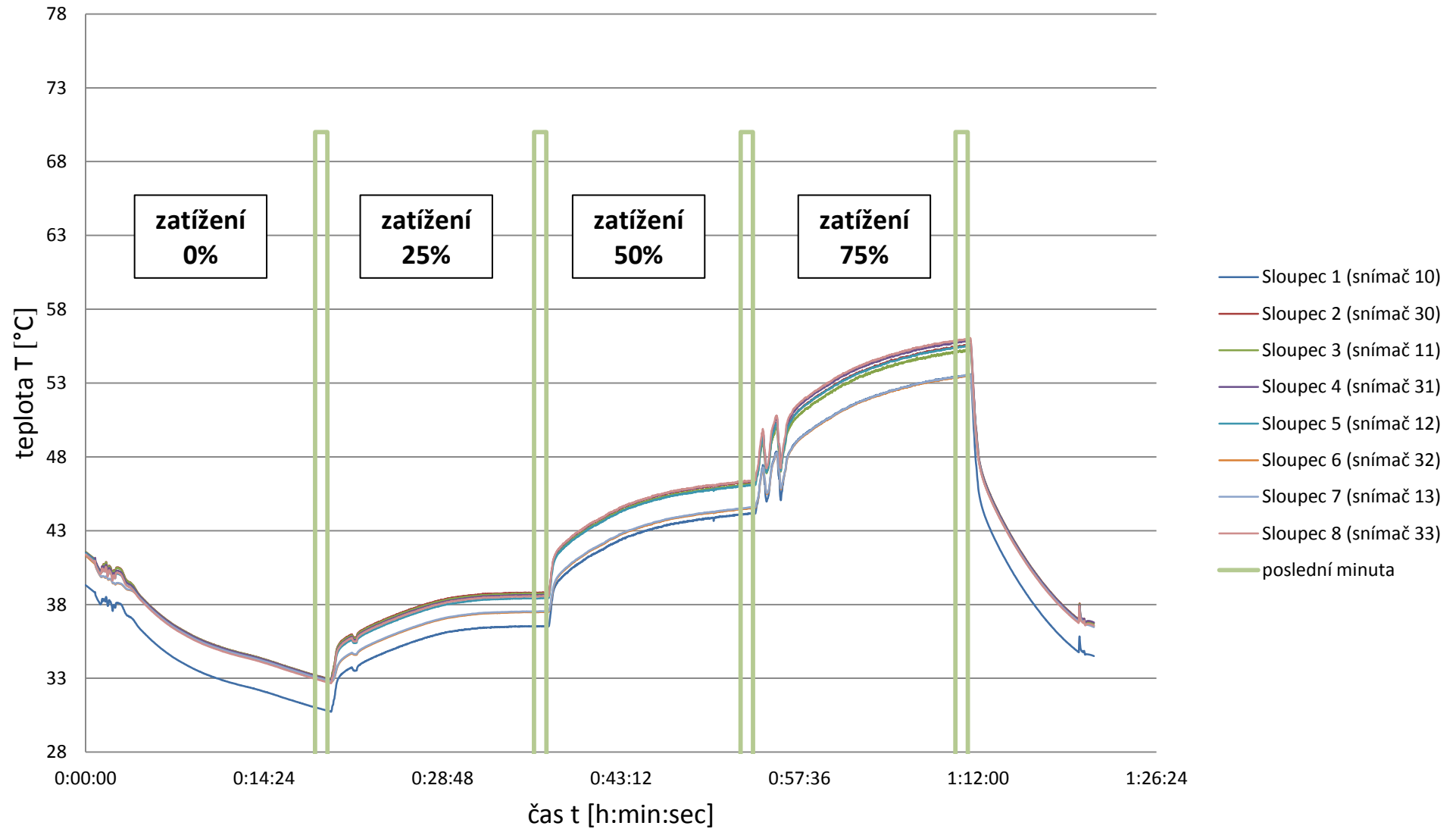


Průběhy teplot v režimech č.45-48

V.st, 4300min⁻¹

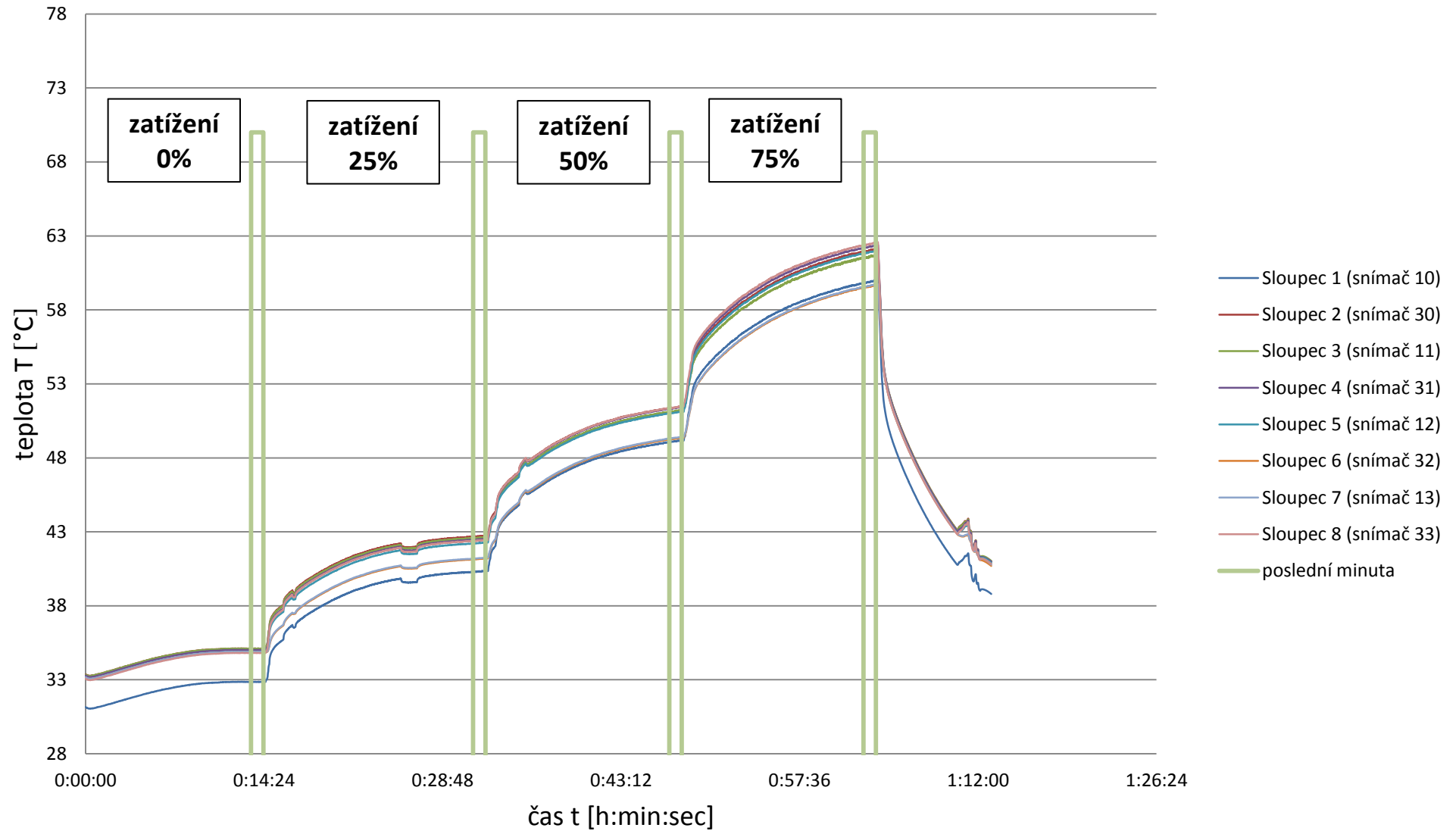


l.st, 3000min⁻¹



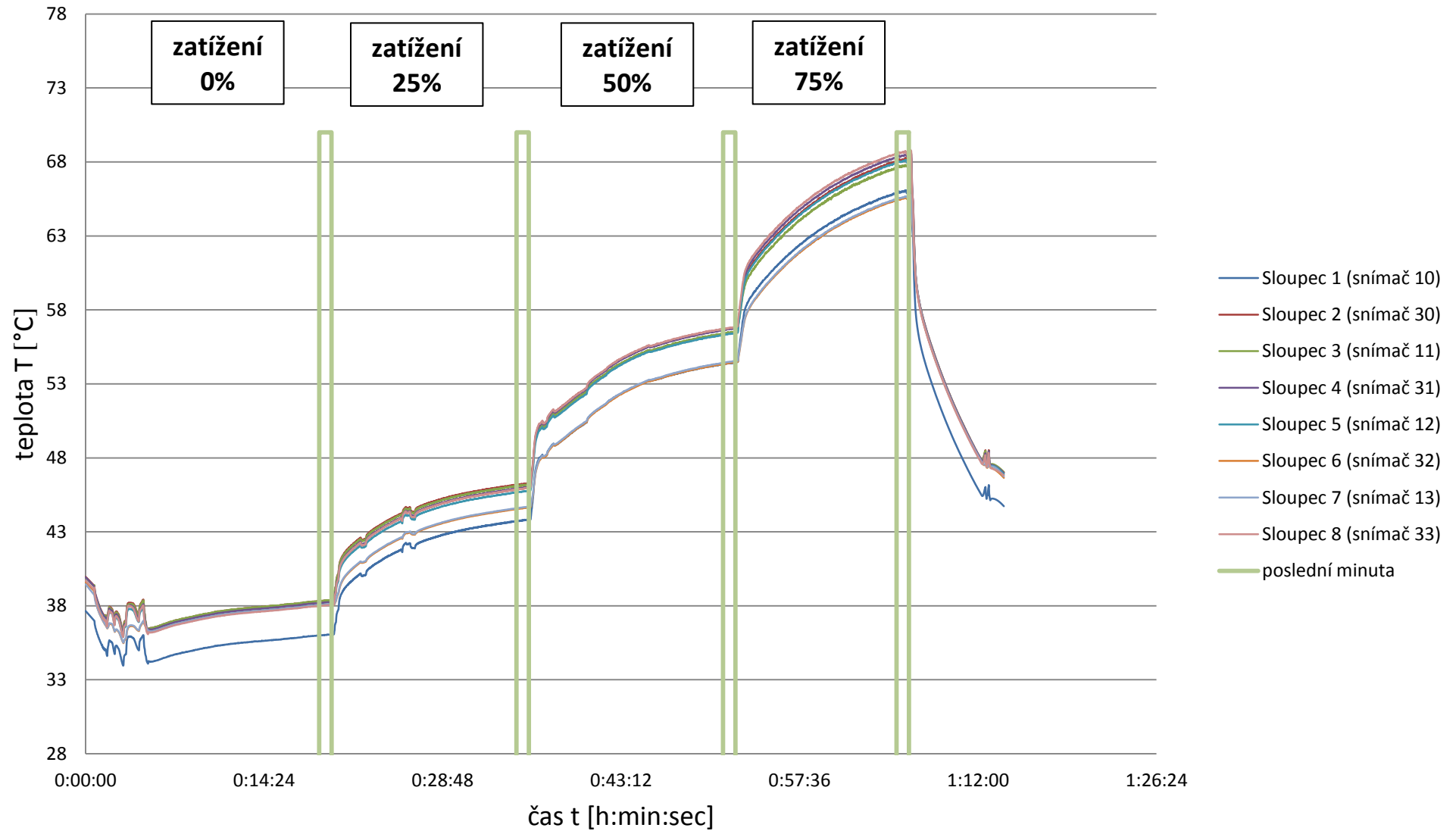
Průběhy teplot v režimech č.53-56

I.st, 3650min⁻¹



Průběhy teplot v režimech č.57-60

I.st, 4300min⁻¹



A.3 Průměry teplot naměřených v zubech

I.A-49-52 (I.st, 3000 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	30,93	36,53	44,14	53,47
30/2	33,10	38,80	46,30	55,49
11/3	33,09	38,72	46,11	55,16
31/4	33,06	38,64	46,33	55,79
12/5	32,93	38,42	46,05	55,45
32/6	32,95	37,48	44,49	53,42
13/7	32,98	37,54	44,55	53,47
33/8	32,85	38,56	46,35	55,93
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	32,99	38,31	45,74	54,96

I.B-53-56 (I.st, 3650 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	32,86	40,32	49,12	59,89
30/2	35,11	42,70	51,40	62,01
11/3	35,11	42,60	51,16	61,59
31/4	35,01	42,49	51,37	62,26
12/5	34,87	42,24	51,06	61,90
32/6	34,85	41,16	49,29	59,57
13/7	34,88	41,22	49,36	59,63
33/8	34,81	42,41	51,42	62,44
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	34,95	42,12	50,72	61,34

I.C-57-60 (I.st, 4300 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	36,03	43,77	54,39	65,99
30/2	38,35	46,23	56,72	68,15
11/3	38,35	46,14	56,45	67,71
31/4	38,22	45,97	56,69	68,41
12/5	38,08	45,72	56,36	68,03
32/6	38,04	44,59	54,40	65,52
13/7	38,07	44,65	54,48	65,60
33/8	38,03	45,91	56,78	68,64
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	38,16	45,60	55,98	67,44

II.A-25-28 (II.st, 3000 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	33,56	38,04	44,66	52,41
30/2	35,67	40,37	46,74	54,16
11/3	35,63	40,26	46,45	53,66
31/4	35,77	40,21	46,93	54,83
12/5	35,65	39,99	46,67	54,54
32/6	35,89	39,50	45,55	53,14
13/7	35,93	39,56	45,63	53,22
33/8	35,55	40,05	46,89	54,86
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	35,73	39,99	46,41	54,06

II.B-29-32 (II.st, 3650 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	35,97	41,90	49,73	58,79
30/2	38,10	44,30	51,86	60,56
11/3	38,07	44,20	51,56	60,04
31/4	38,21	44,10	52,04	61,25
12/5	38,10	43,87	51,74	60,93
32/6	38,39	43,29	50,45	59,32
13/7	38,43	43,35	50,54	59,40
33/8	38,01	43,98	52,05	61,35
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	38,19	43,87	51,46	60,41

II.C-33-36 (II.st, 4300 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	39,46	45,84	54,73	64,39
30/2	41,70	48,33	56,92	66,18
11/3	41,67	48,20	56,57	65,59
31/4	41,74	48,09	57,10	66,89
12/5	41,62	47,84	56,78	66,54
32/6	41,90	47,19	55,35	64,75
13/7	41,95	47,25	55,45	64,86
33/8	41,54	47,98	57,12	67,01
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	41,73	47,84	56,47	65,97

III.A-13-16 (III.st, 3000 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	36,54	41,43	46,74	52,63
30/2	38,61	43,81	48,92	54,46
11/3	38,56	43,72	48,69	54,05
31/4	38,82	43,67	49,05	55,07
12/5	38,71	43,45	48,78	54,77
32/6	39,19	43,29	47,98	53,68
13/7	39,23	43,35	48,06	53,78
33/8	38,60	43,49	48,98	55,05
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	38,82	43,54	48,64	54,41

III.B-17-20 (III.st, 3650 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	41,77	45,27	51,36	57,28
30/2	43,98	47,70	53,51	59,04
11/3	43,93	47,58	53,23	58,56
31/4	44,10	47,53	53,68	59,70
12/5	43,98	47,31	53,40	59,41
32/6	44,50	47,20	52,49	58,17
13/7	44,55	47,27	52,61	58,32
33/8	43,89	47,35	53,60	59,68
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	44,13	47,42	53,22	58,98

III.C-21-24 (III.st, 4300 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	44,34	49,52	56,04	62,62
30/2	46,55	51,99	58,19	64,31
11/3	46,49	51,84	57,85	63,71
31/4	46,71	51,77	58,35	65,08
12/5	46,61	51,56	58,08	64,78
32/6	47,27	51,40	56,99	63,26
13/7	47,33	51,49	57,15	63,45
33/8	46,49	51,60	58,28	65,09
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	46,78	51,66	57,84	64,24

IV.A-1-4 (IV.st, 3000 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	40,69	45,45	50,04	55,52
30/2	42,76	47,82	52,17	57,25
11/3	42,69	47,67	51,88	56,76
31/4	43,05	47,74	52,37	57,95
12/5	42,95	47,53	52,10	57,66
32/6	43,68	47,58	51,51	56,74
13/7	43,74	47,65	51,62	56,89
33/8	42,81	47,53	52,24	57,86
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	43,10	47,64	51,98	57,30

IV.B-5-8 (IV.st, 3650 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	45,54	51,16	56,77	62,93
30/2	47,67	53,59	58,85	64,47
11/3	47,59	53,44	58,53	63,93
31/4	47,97	53,48	59,15	65,45
12/5	47,88	53,29	58,89	65,19
32/6	48,68	53,33	58,10	64,02
13/7	48,76	53,42	58,25	64,19
33/8	47,73	53,26	59,03	65,39
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	48,04	53,40	58,69	64,66

IV.C-9-12 (IV.st, 4300 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	47,65	53,43	59,11	65,17
30/2	49,76	55,84	61,17	66,67
11/3	49,67	55,66	60,79	66,09
31/4	50,09	55,76	61,51	67,72
12/5	50,01	55,60	61,29	67,51
32/6	50,96	55,78	60,51	66,28
13/7	51,05	55,88	60,67	66,48
33/8	49,84	55,54	61,37	67,65
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	50,20	55,72	61,04	66,91

V.A-37-40 (V.st, 3000 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	42,44	45,38	49,81	54,54
30/2	44,48	47,66	51,85	56,17
11/3	44,39	47,50	51,56	55,73
31/4	44,81	47,64	52,10	56,94
12/5	44,73	47,49	51,88	56,72
32/6	45,62	47,86	51,53	56,01
13/7	45,69	47,95	51,64	56,13
33/8	44,56	47,40	51,93	56,81
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	44,90	47,64	51,78	56,36

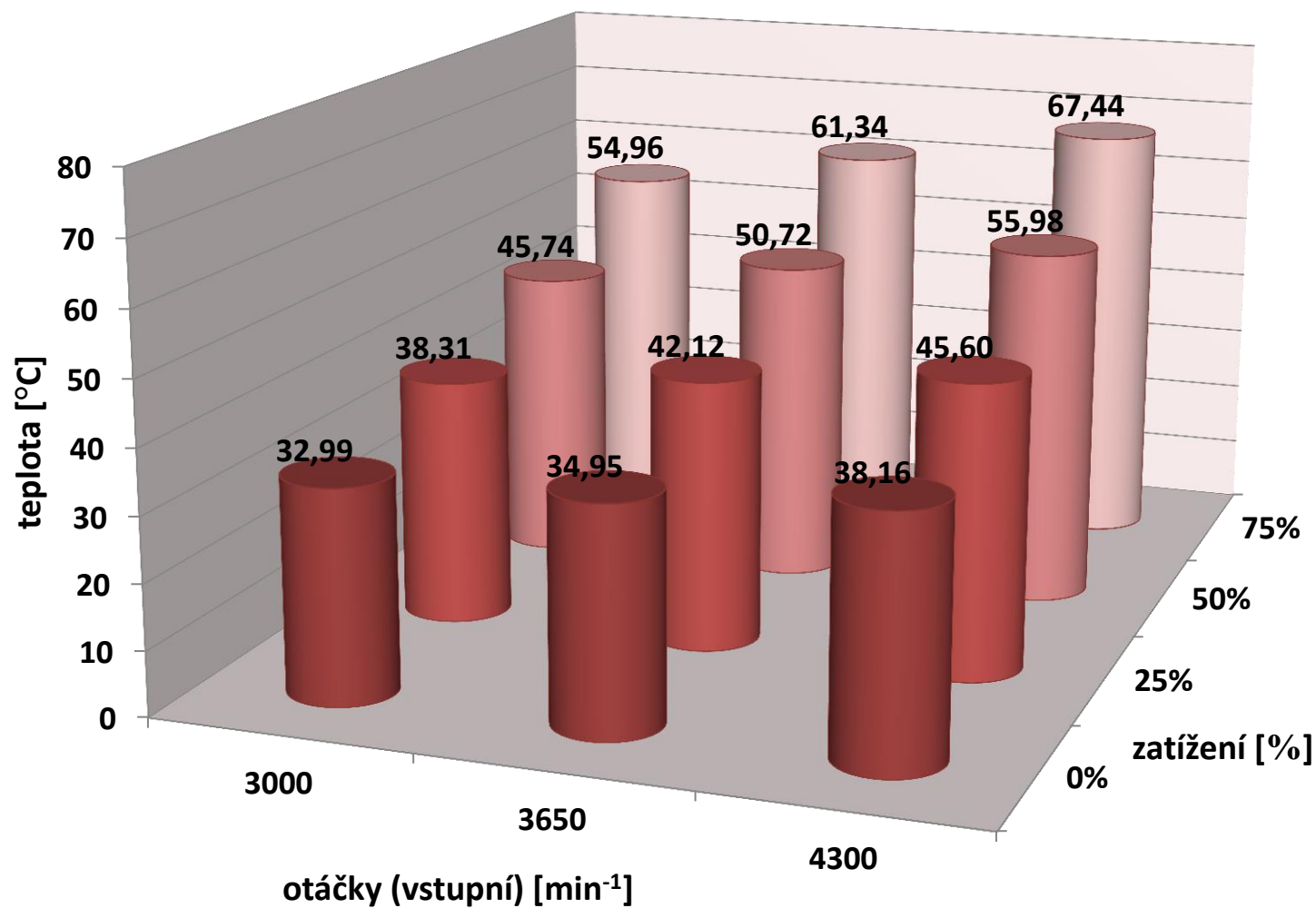
V.B-41-44 (V.st, 3650 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	48,32	51,99	56,53	62,35
30/2	50,44	54,33	58,57	63,87
11/3	50,33	54,14	58,22	63,35
31/4	50,76	54,34	58,91	64,87
12/5	50,69	54,20	58,70	64,67
32/6	51,64	54,57	58,27	63,81
13/7	51,73	54,66	58,40	63,93
33/8	50,51	54,11	58,76	64,78
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	50,87	54,34	58,55	64,18

V.C-45-48 (V.st, 4300 min ⁻¹)				
ČÍSLO KANÁLU (SNÍMAČE)/SLOUPEC	ZATÍŽENÍ			
	0%	25%	50%	75%
10/1	54,42	58,55	64,26	69,86
30/2	56,67	60,97	66,37	71,42
11/3	56,54	60,77	65,99	70,86
31/4	56,94	61,00	66,78	72,54
12/5	56,86	60,83	66,55	72,33
32/6	57,82	61,13	65,93	71,28
13/7	57,92	61,23	66,05	71,38
33/8	56,70	60,79	66,68	72,51
PRŮMĚRNÁ TEPLOTA (z hodnot 2-8)	57,06	60,96	66,34	71,76

A.4 Diagramy průměrných teplot

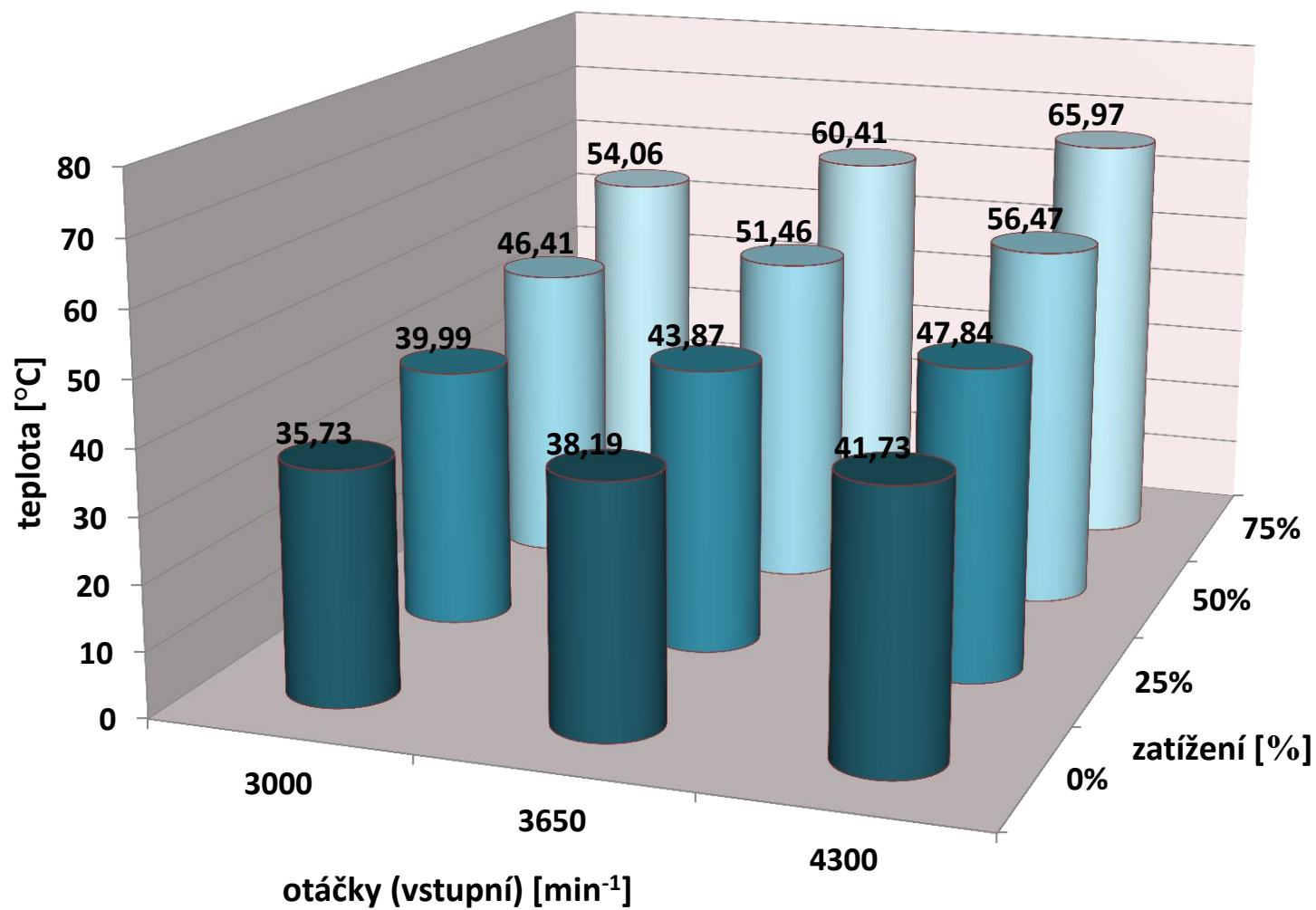
I. rychlostní stupeň

teplota zubu, průměr všech míst měření, poslední minuta režimu



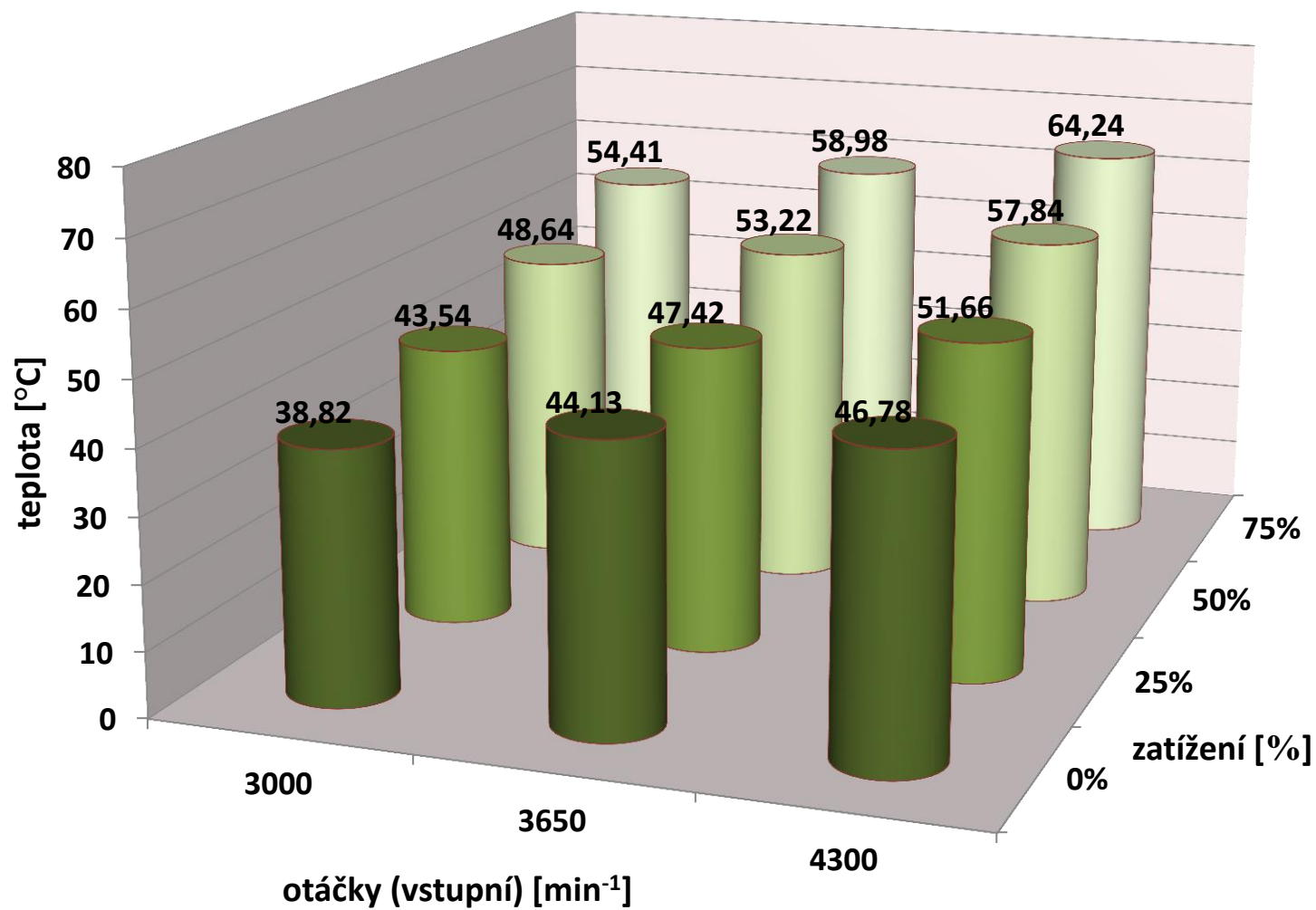
II. rychlostní stupeň

teplota zubu, průměr všech míst měření, poslední minuta režimu



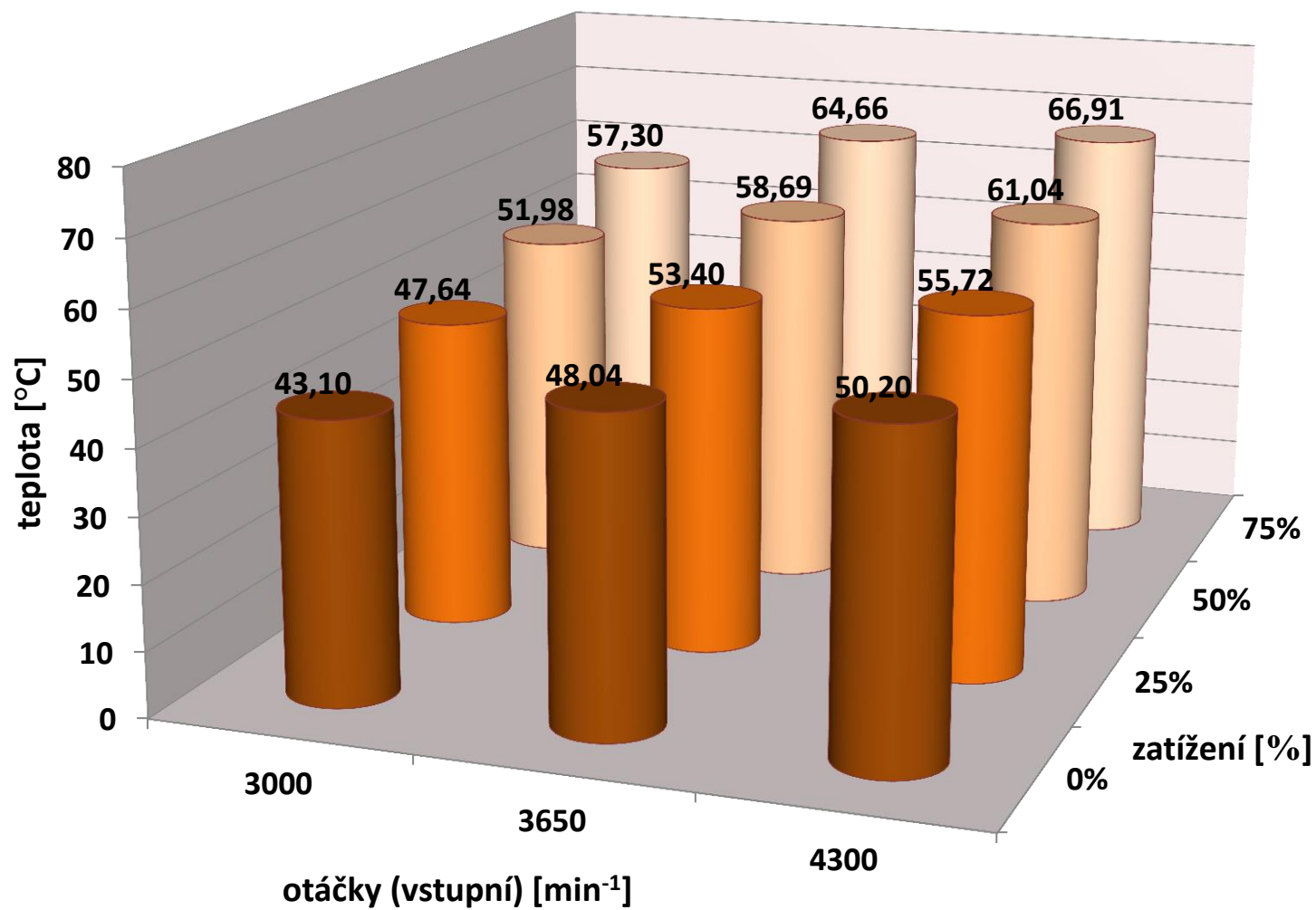
III. rychlostní stupeň

teplota zubu, průměr všech míst měření, poslední minuta režimu



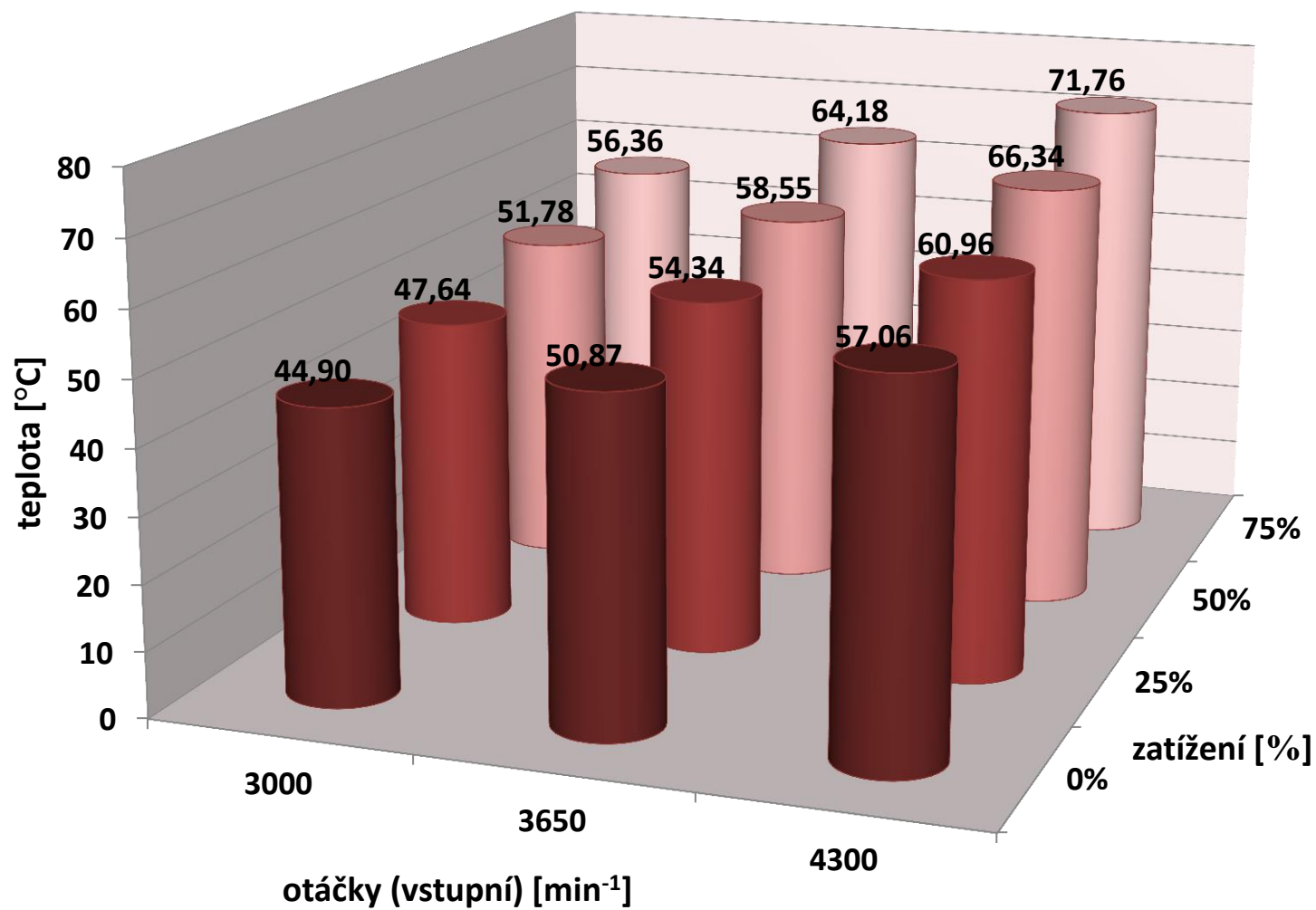
IV. rychlostní stupeň

teplota zubu, průměr všech míst měření, poslední minuta režimu

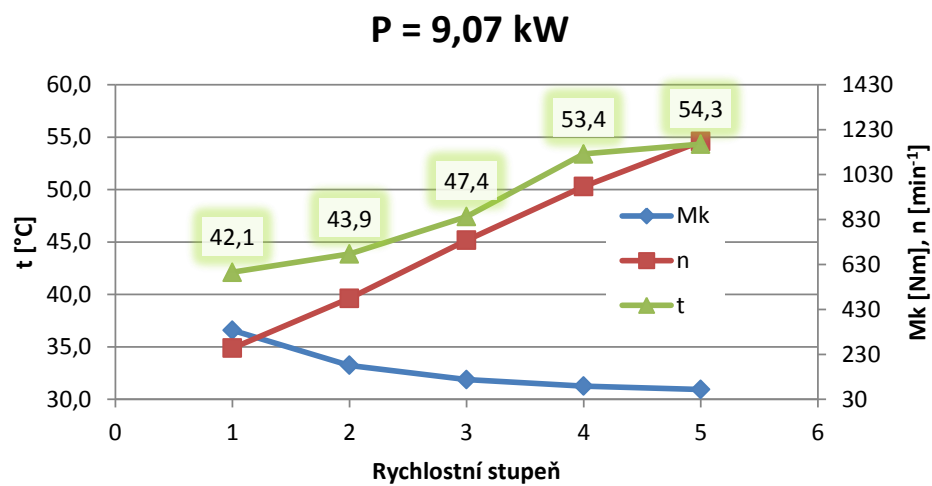
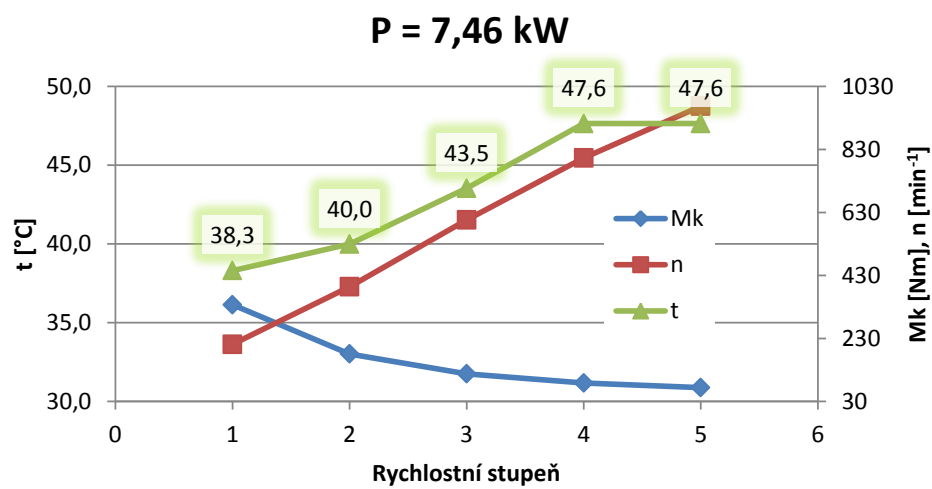


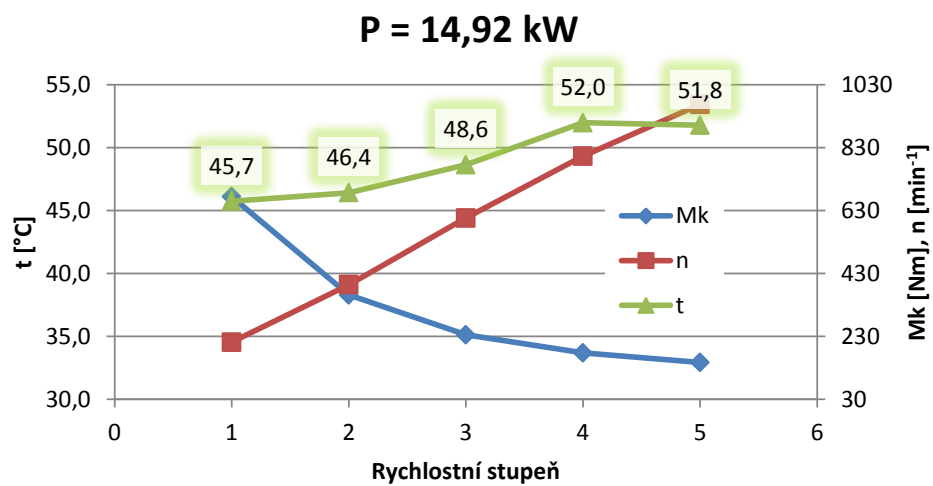
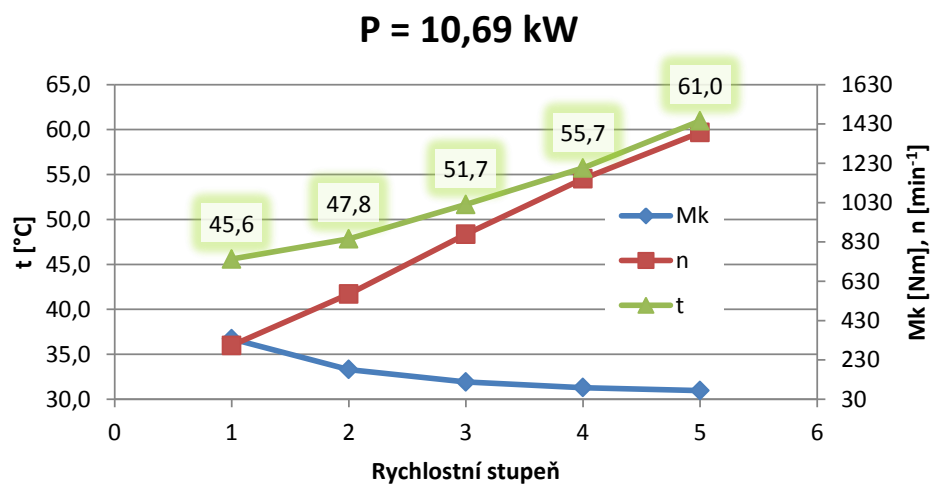
V. rychlostní stupeň

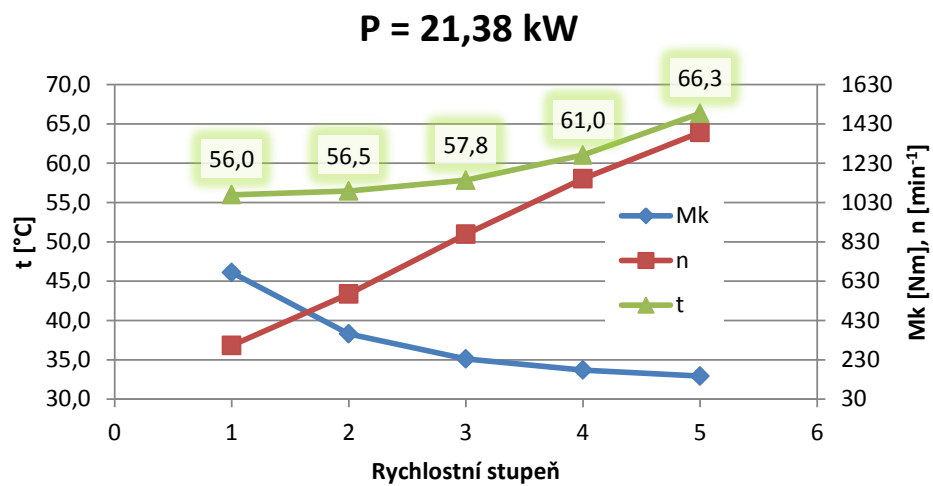
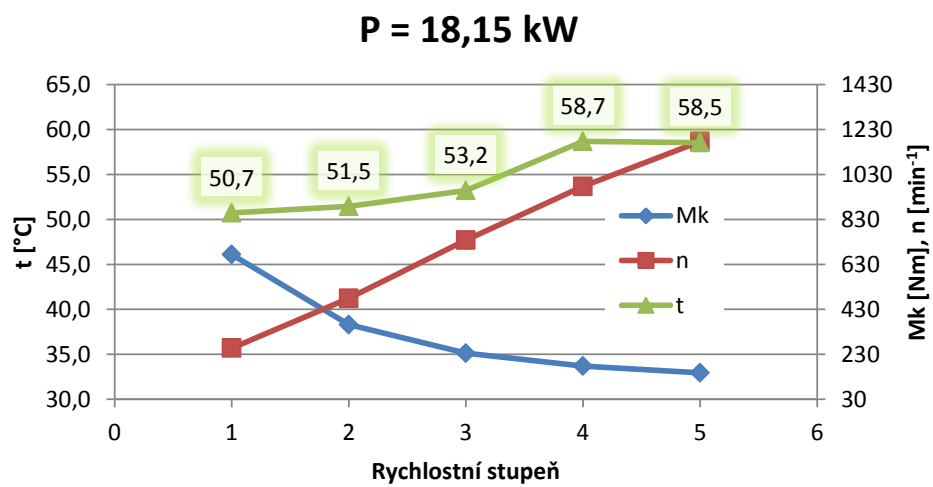
teplota zubu, průměr všech míst měření, poslední minuta režimu

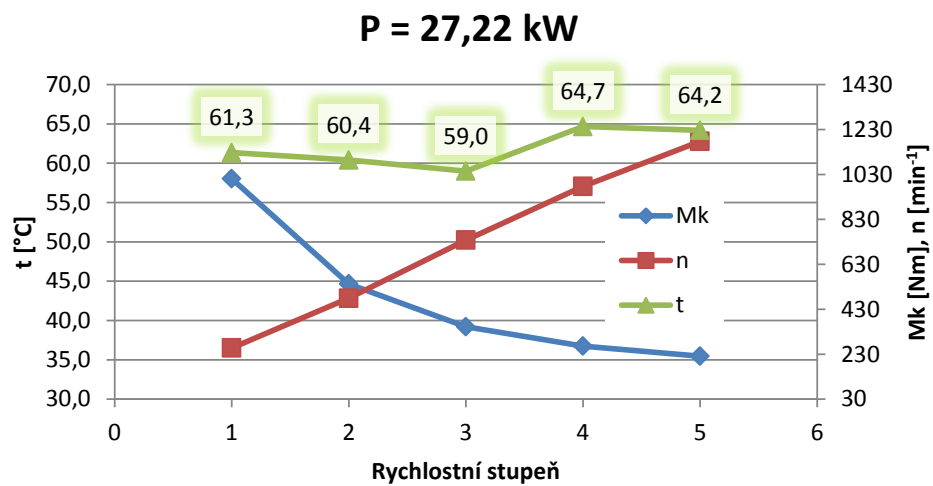
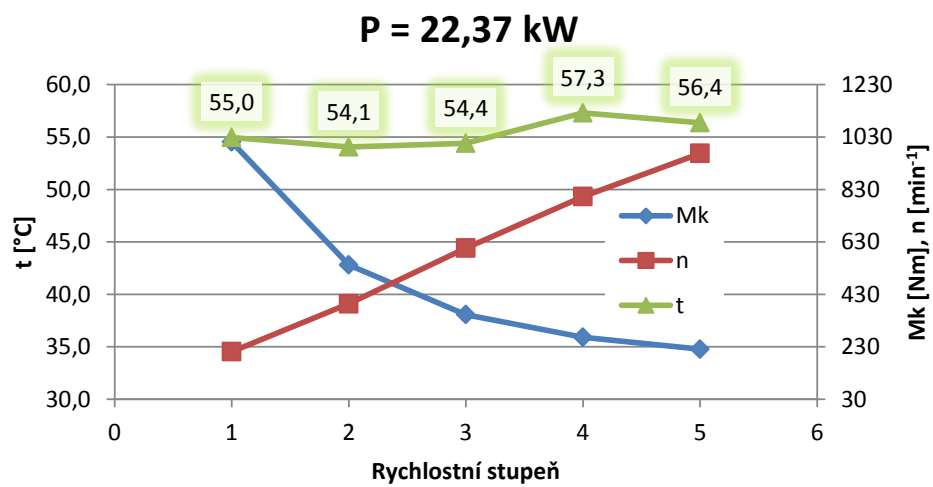


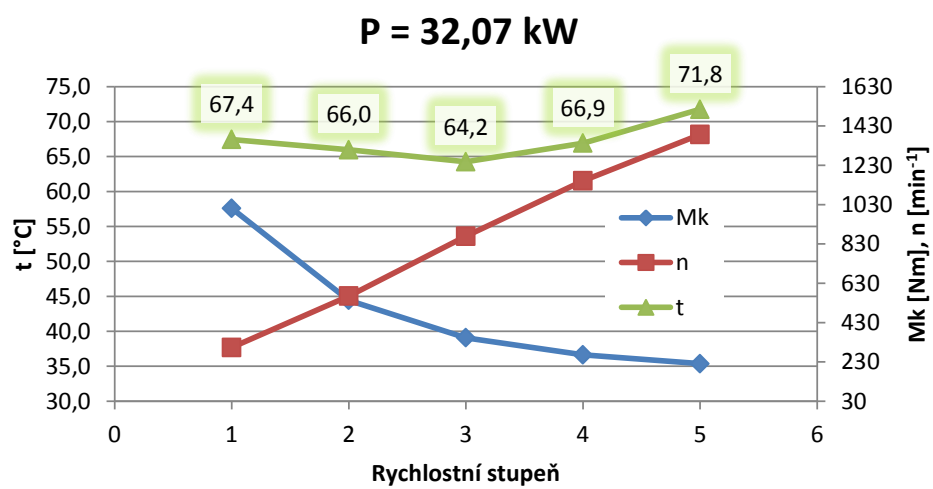
A.5 Teploty ozubení při konstantním výkonu







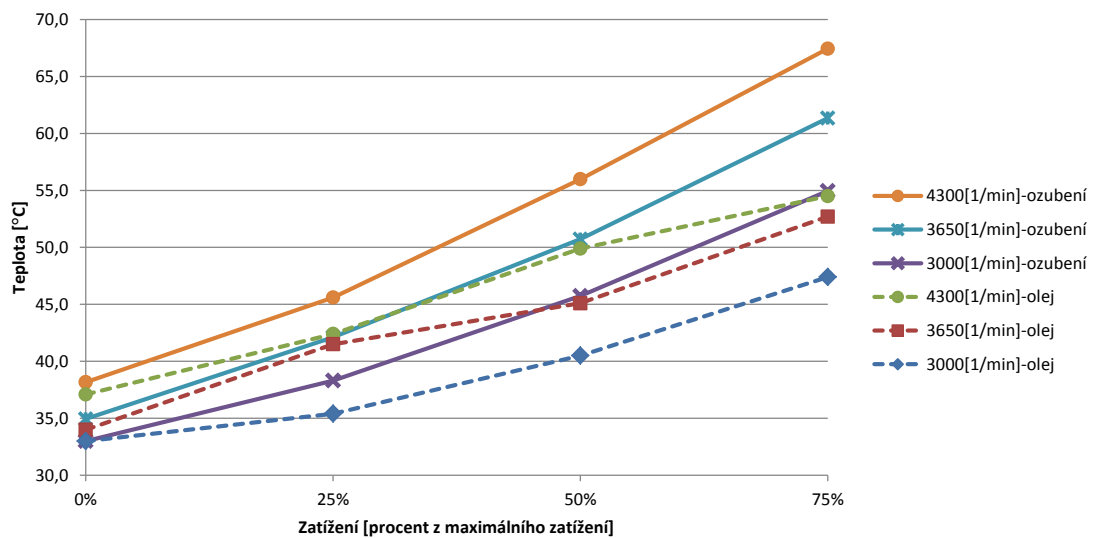




A.6 Porovnání teplot oleje a teplot ozubení

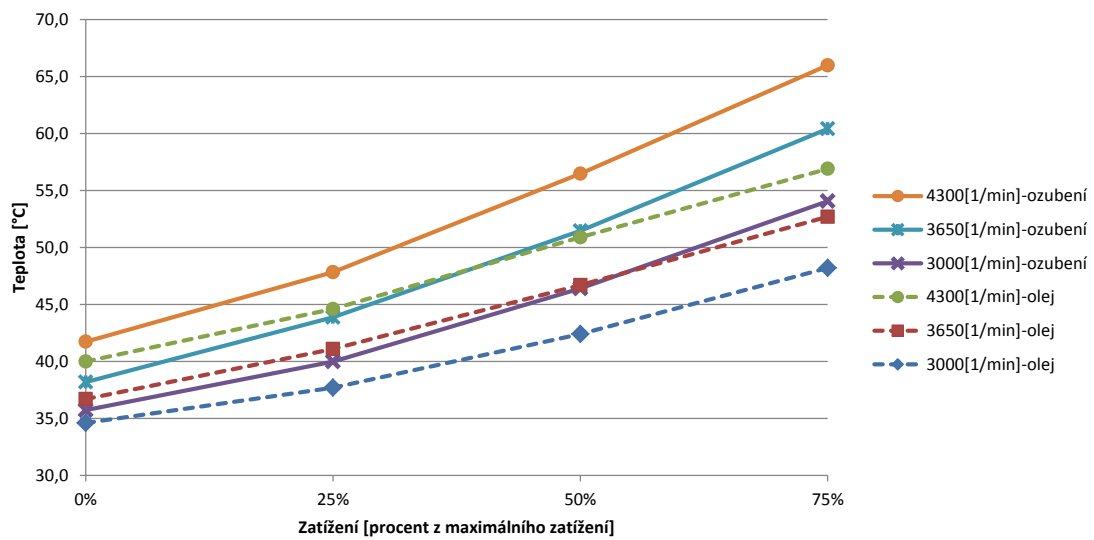
Teplota oleje a ozubení - I.st

průměrná teplota na konci časového intervalu



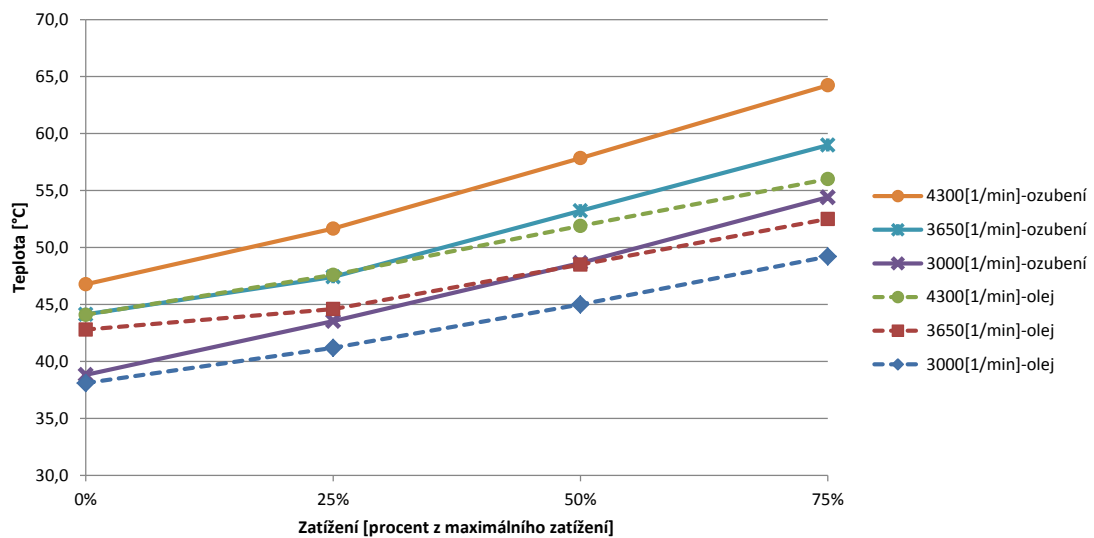
Teplota oleje a ozubení - II.st

průměrná teplota na konci časového intervalu



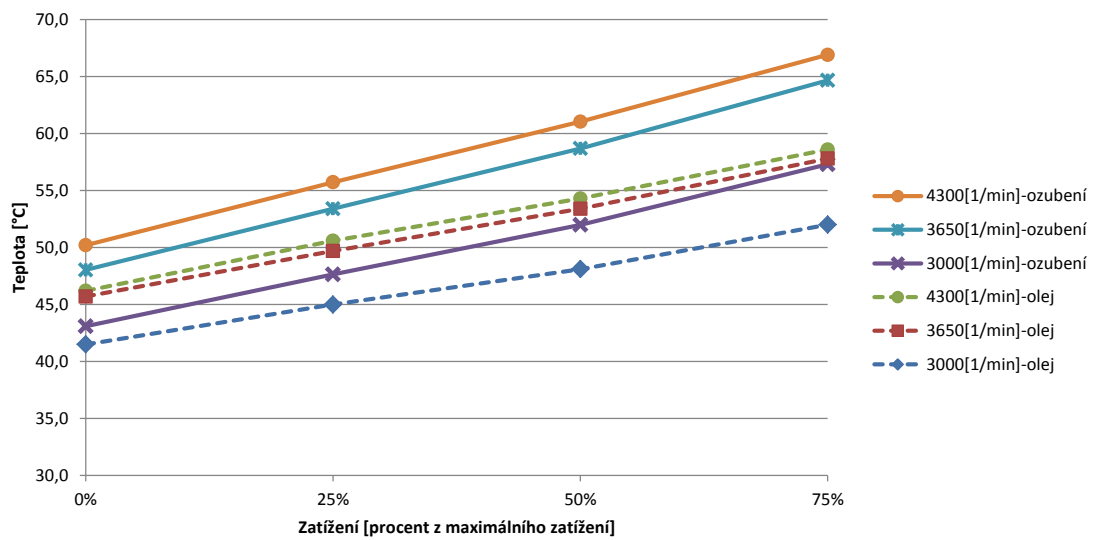
Teplota oleje a ozubení - III.st

průměrná teplota na konci časového intervalu



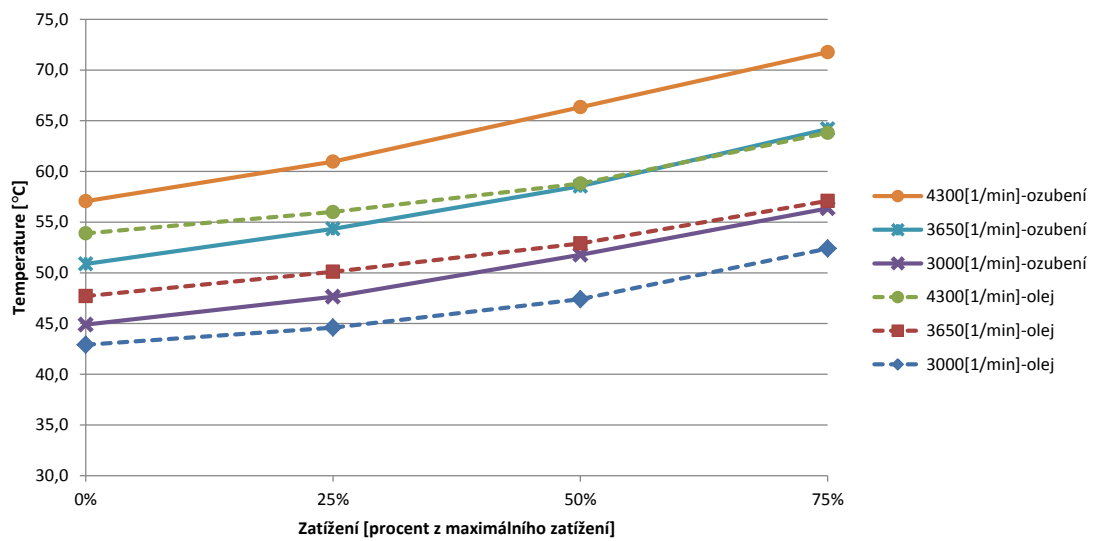
Teplota oleje a ozubení - IV.st

průměrná teplota na konci časového intervalu



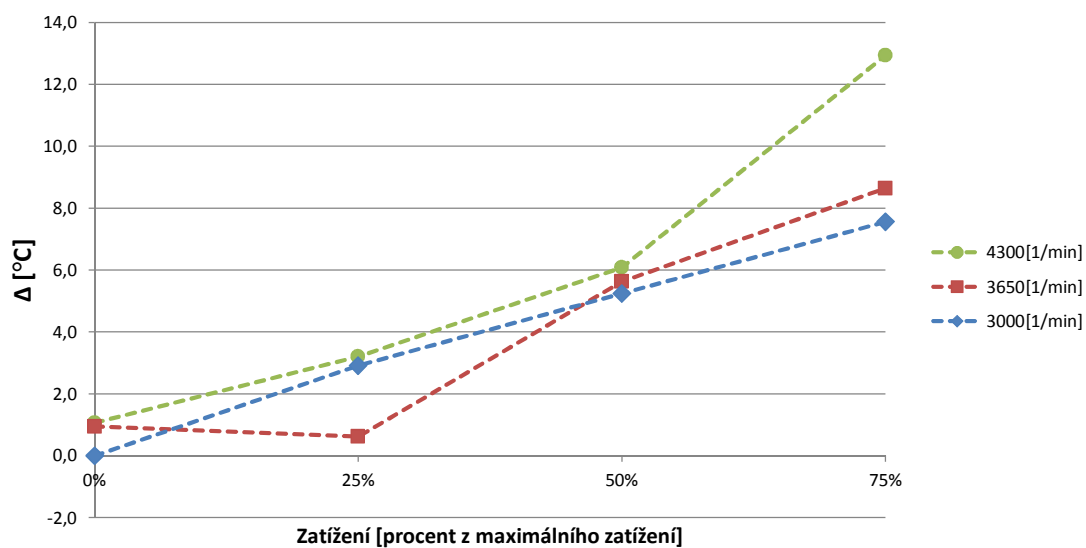
Teplota oleje a ozubení - V.st

průměrná teplota na konci časového intervalu

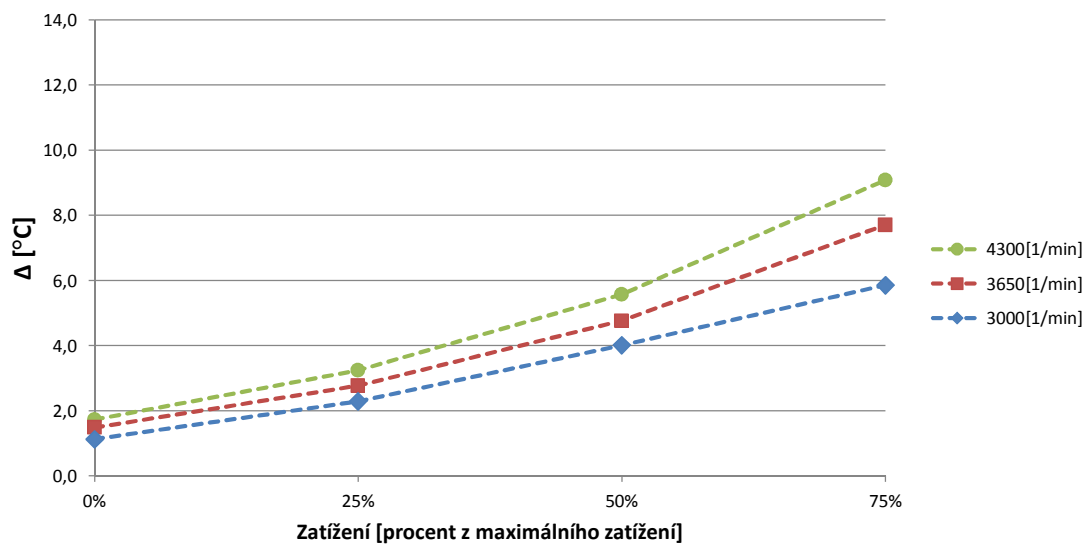


A.7 Diagramy diferencí mezi teplotami ozubení a teplotami oleje

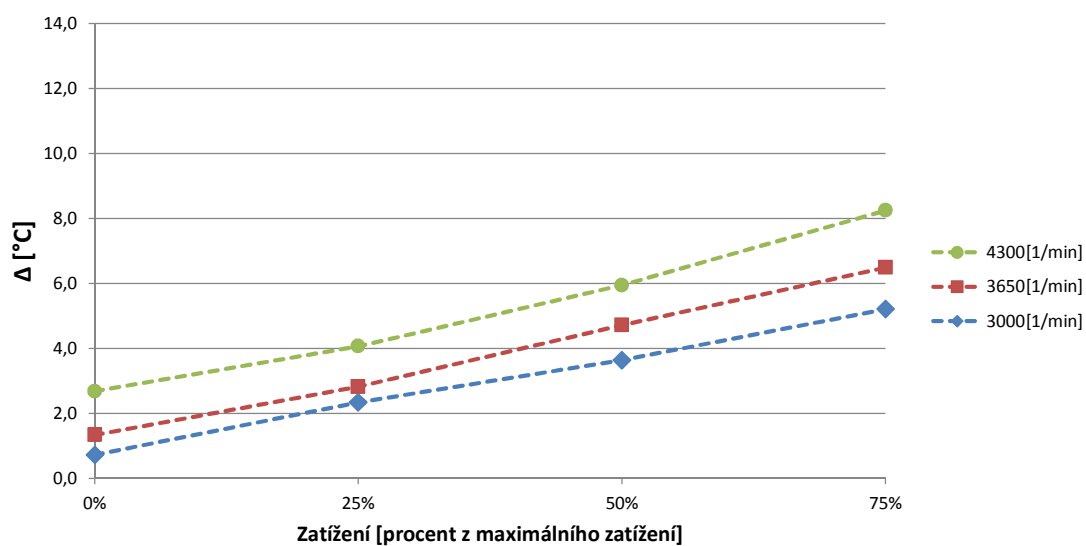
Teplota oleje a ozubení: $\Delta = (t_{\text{ozubení}} - t_{\text{oleje}})$; I.st
 rozdíl teploty ozubení a oleje



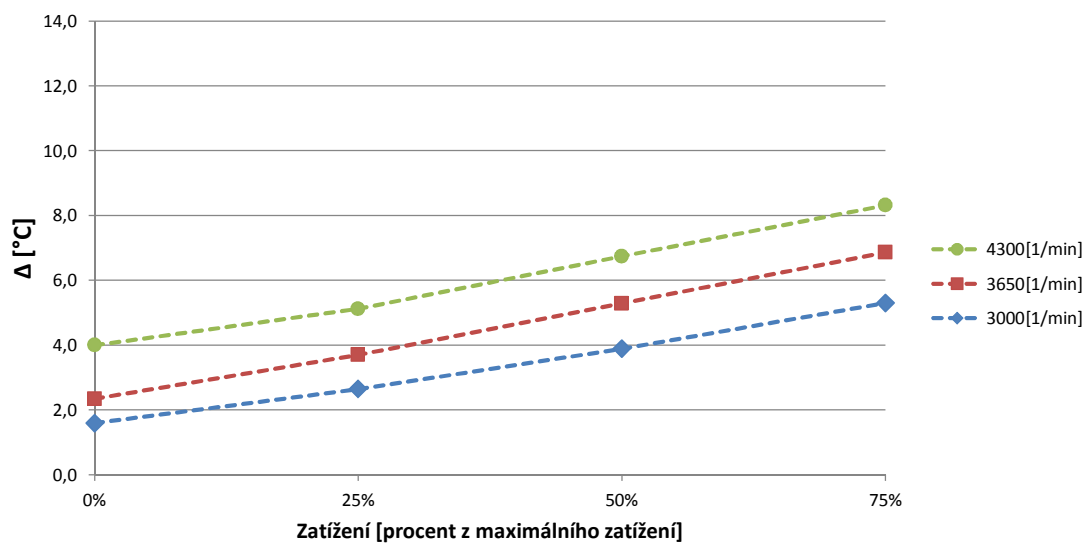
Teplota oleje a ozubení: $\Delta = (t_{\text{ozubení}} - t_{\text{oleje}})$; II.st
 rozdíl teploty ozubení a oleje



Teplota oleje a ozubení: $\Delta = (t_{\text{ozubení}} - t_{\text{oleje}})$; III.st
 rozdíl teploty ozubení a oleje



Teplota oleje a ozubení: $\Delta = (t_{\text{ozubení}} - t_{\text{oleje}})$; IV.st
 rozdíl teploty ozubení a oleje



Teplota oleje a ozubení: $\Delta = (t_{\text{ozubení}} - t_{\text{oleje}})$; V.st
 rozdíl teploty ozubení a oleje

